

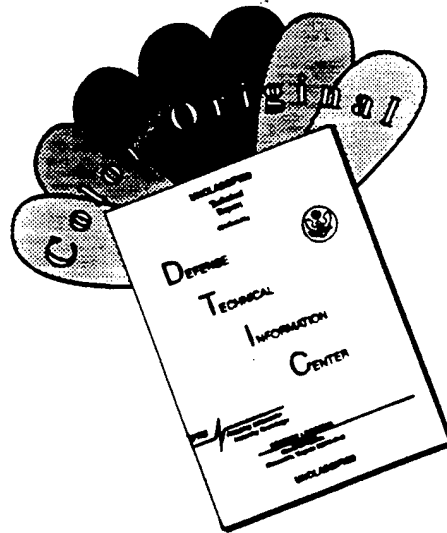
TNO-rapport
PML 1995-A61

Onderzoek naar de dynamische en ballistische sterkte van een type kunststof lichtgewicht paneel

TNO Prins Maurits Laboratorium

19960801 162

DISCLAIMER NOTICE

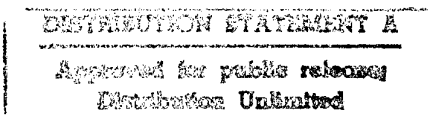


THIS DOCUMENT IS BEST QUALITY AVAILABLE. THE COPY FURNISHED TO DTIC CONTAINED A SIGNIFICANT NUMBER OF COLOR PAGES WHICH DO NOT REPRODUCE LEGIBLY ON BLACK AND WHITE MICROFICHE.

TNO-rapport
PML 1995-A61

Onderzoek naar de dynamische en ballistische sterkte van een type kunststof lichtgewicht paneel

TNO Prins Maurits Laboratorium



Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 842 842
Fax 015 843 991

Datum
juni 1996

Auteur(s)
R.M. van de Kastele
Ir. J.C.A.M. van Doormaal

Rubricering
Vastgesteld door : Ir. D. Boon
Vastgesteld d.d. : 9 mei 1996
(deze rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd
Managementuittreksel : Ongerubriceerd
Samenvatting : Ongerubriceerd
Rapporttekst : Ongerubriceerd
Bijlagen A - D : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Exemplaar nr. : 12
Oplage : 25
Aantal pagina's : 105 (incl. bijlagen,
excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen : 4

© 1995 TNO

DTIC QUALITY INSPECTED 1

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel
van de hoofdgroep TNO-Defensieonderzoek
waartoe verder behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
TNO Technische Menskunde



Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

TNO Prins Maurits Laboratorium

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Phone +31 15 284 28 42
Fax +31 15 284 39 58

Doorkiesnummer

015 - 284 33 89

Datum

3-7-1996

Ons nummer

96D2/1349/lvd

Onderwerp

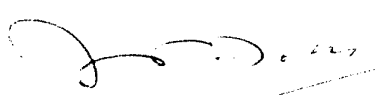
Uw brief

Rapport PML1995 A61

Hierbij doen wij de voor u bestemde exemplaren toekomen van rapport PML1995-A61 getiteld "Onderzoek naar dynamische en ballistische sterkte van een type kunststof lichtgewicht paneel" door R.M. van de Kastele en Ir J.C.A.M. van Doormaal.

De als sandwich-constructie opgebouwde lichtgewicht panelen zijn blootgesteld aan explosie-effecten. De dynamische weerstand tegen een schokgolf of de ballistische weerstand tegen fragmenten is beperkt. De algemene conclusie is dat deze vorm van panelen niet geschikt is om toe te passen als beschermende lichtgewicht paneel tegen explosie-effecten.

Mocht u vragen en/of opmerkingen hebben met betrekking tot het rapport, dan kunt u contact opnemen met de auteur van dit rapport, te bereiken op het bovengenoemde doorkiesnummer.



Ir. M. van Zelm
Directeur Programma

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel van de
Hoofdgroep Defensieonderzoek waartoe verder
behoren:

TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
TNO Technische Menskunde

Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO,
zoals gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage.

Managementuittreksel

Titel : Onderzoek naar de dynamische en
ballistische sterkte van een type kunststof lichtgewicht paneel
Auteur(s) : R.M. van de Kastele en Ir. J.C.A.M. van Doormaal
Datum : juni 1996
Opdrachtnr. : A93/D/434
Rapportnr. : PML 1995-A61

Een haalbaarheidsstudie is uitgevoerd naar de geschiktheid van een bestaand lichtgewicht hitte en drukbestendig kunststof paneel als bescherming tegen ballistische en/of schokgolf effecten. Het onderzoek is uitgevoerd voor DGW&T, de afdeling Advies Wetenschappelijke Onderzoek en Ondersteuning (AWOO) onder nummer A93/D/434.

De doelstelling van het onderzoek was het experimenteel testen van één type lichtgewicht paneel waarbij de weerstand tegen schokgolf en ballistische effecten bepaald diende te worden. Het paneel is niet ontworpen om bescherming te bieden tegen schokgolven en ballistische effecten. Het is speciaal ontworpen voor toepassing in de offshore als bescherming in geval van een gasexplosie. Bij TNO Prins Maurits Laboratorium uitgevoerde experimenten om het paneel te testen op zijn geschiktheid voor toepassing in de offshore hadden een positief resultaat. Naar aanleiding van deze experimenten is de mogelijkheid geopperd dat de panelen misschien ook geschikt zijn voor toepassing in de beschermingskunde. Dit was de aanleiding om de panelen op schokgolf en ballistische weerstand te testen.

Voor het onderzoek zijn vijf panelen gemaakt. Vier panelen zijn gebruikt om de dynamische weerstand tijdens een schokgolfbelasting vast te stellen en één paneel is gebruikt voor het vaststellen van de ballistische weerstand. De panelen waren opgebouwd als een sandwich-constructie van twee glasvezel/kunsthars buitenzijden met daartussen een honingraat-kern gevuld met een poeder.

Voor het vaststellen van de dynamische weerstand van een paneel onder een schokgolf-belasting zijn de panelen geplaatst achter een schokgolfsimulator en belast met een in de simulator gegenereerde schokgolf. De dynamische weerstand is vastgesteld door de respons van de panelen tijdens verschillende belasting-niveaus te registreren en de schade na een experiment te analyseren. In totaal waren voor het meten van de respons 19 opnemers toegepast, te weten: 2 druk-, 8 rek-strook-, 5 verplaatsings-, en 4 versnellingsopnemers.

De ballistische weerstand van het paneel is onderzocht door fragmentatie simulatie projectielen (FSP) op het paneel te schieten. Door de limiet snelheid van de FSP vast te stellen werd de weerstand van het paneel bepaald voor de inslag van een granaatscherf.

Resultaat van het onderzoek is dat bekend is hoe de panelen zich gedragen onder een schokgolf. Het is waargenomen dat de panelen delamineren bij belastingen hoger dan 70 kPa. Na een delaminatie kan het poeder uit de kern vrij komen. Dit poeder is zeer fijn en kan veel problemen veroorzaken wanneer de panelen worden toegepast om mensen of materieel te beschermen.

De vooraf gekozen bevestiging door middel van bouten was niet optimaal. Bij hogere belastingen werd het paneel over de kop van de bouten heen getrokken. Het paneel heeft een slechte ballistische weerstand (limiet snelheid 535 m/s) en kan alleen ingezet worden als bescherming tegen kleine en lichte granaat scherven.

Voor verbeteringen kan gedacht worden aan het stijver maken van de buitenste lagen, het verwijderen van de kern of het toepassen van een niet poedervormige kern.

De manier waarop de panelen bevestigd werden kan verbeterd worden. Hiervoor kan gedacht worden aan vierzijdige inklemming, meerdere bouten, het vergroten van het oppervlak waar de panelen ingeklemd worden door bijvoorbeeld een strip onder de bouten of een profiel over het paneel.

De algemene conclusie is dat het paneel in de huidige vorm niet geschikt is voor het toepassen als lichtgewicht paneel inzetbaar voor bescherming tegen invallende schokgolven met een piekdruk hoger dan ongeveer 30 à 40 kPa en een positieve faseduur van circa 30 à 35 ms of tegen ernstige ballistische dreiging.

Aangezien het paneel niet ontworpen is om bescherming te bieden tegen schokgolven en ballistische effecten komt het niet als verrassing dat de resultaten ten aanzien hiervan niet zo goed zijn. De experimentele resultaten tonen echter wel de zwakke eigenschappen van het paneel, waardoor het doelgericht verbeterd kan worden.

Samenvatting

Een haalbaarheidsstudie is uitgevoerd naar de mogelijkheid om lichtgewicht hitte- en drukbestendige kunststof panelen toe te passen voor bescherming tegen ballistische en/of schokgolf effecten.

De doelstelling van het onderzoek was het experimenteel testen van één type lichtgewicht paneel waarbij de weerstand tegen schokgolf en ballistische effecten bepaald diende te worden. Het paneel was niet voor deze doeleinden ontworpen. Vier panelen zijn getest op dynamische weerstand en één paneel is getest op de ballistische weerstand. De dynamische weerstand is onderzocht door de panelen te plaatsen achter een schokgolfsimulator en te belasten door een schokgolf. De respons van de panelen onder een schokgolfbelasting is daarbij gemeten. De ballistische weerstand is bepaald door het vaststellen van de limietsnelheid van een op het paneel afgevuurde FSP.

De algemene conclusie is dat het paneel in huidige vorm niet geschikt is voor het toepassen als lichtgewicht paneel voor bescherming tegen schokgolven met een invallende druk hoger dan 40 kPa en een positieve faseduur van 30 ms of ballistische dreiging. Aanbevelingen voor verbeteringen zijn gedaan.

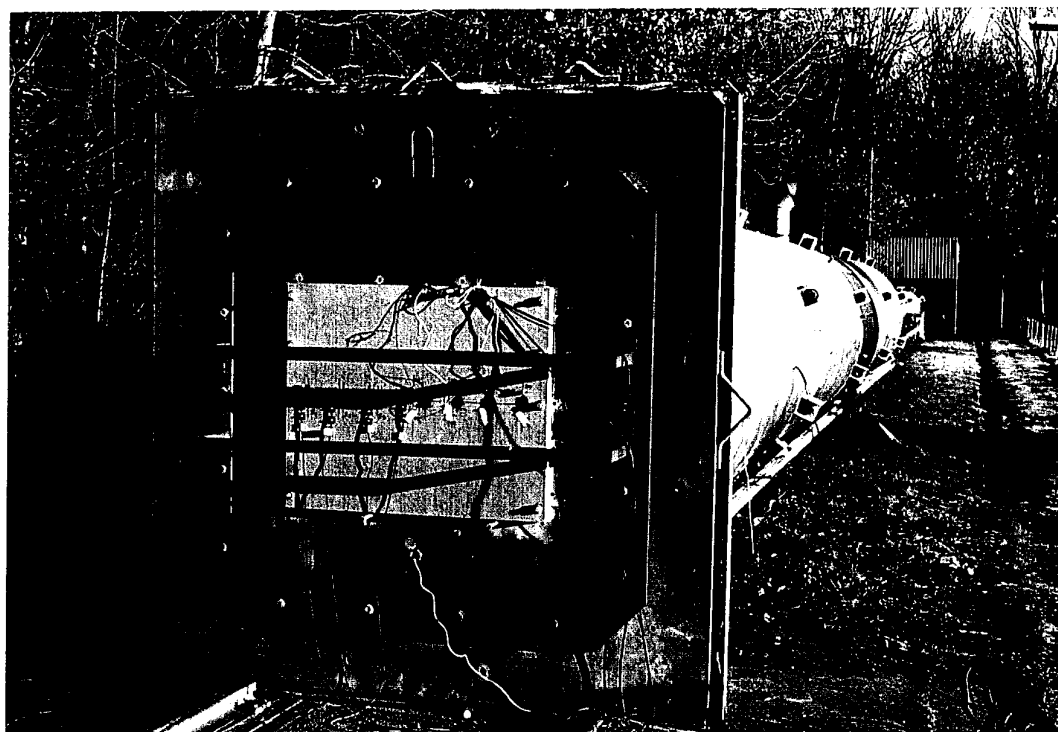
Inhoud

Managementuittreksel	2
Samenvatting	4
1 Inleiding	6
2 Proefopzet	7
2.1 Algemeen	7
2.2 Panelen	7
2.3 Beproevingsmethode voor bepaling dynamische sterkte	8
2.4 Beproevingsmethode voor bepaling ballistische sterkte	9
2.5 Instrumentatie	9
3 Resultaten	12
3.1 Algemeen	12
3.2 Beschrijving van de uitwerking van de schokgolfbelasting op de panelen	12
3.3 Resultaten metingen	15
3.4 Resultaten ballistische proeven	29
4 Conclusie en aanbevelingen	31
5 Referenties	32
6 Ondertekening	33
Bijlagen:	
A Grafische weergave van de druk signalen	
B Grafische weergave van de rekstrook signalen	
C Grafische weergave van de verplaatsings signalen	
D Grafische weergave van de versnellings signalen	

1 Inleiding

In vervolg op een onderzoek uitgevoerd voor de offshore industrie is door TNO Prins Maurits Laboratorium, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid, groep Explosiepreventie en Bescherming een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar mogelijke toepassingen van lichtgewicht hitte en drukbestendige kunststof panelen voor bescherming tegen ballistische en/of schokgolf effecten. Het onderzoek is uitgevoerd voor het Ministerie van Defensie, DGW&T, Afdeling Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling (AWOO) onder nummer A93/D/434.

De doelstelling van het onderzoek was het experimenteel testen van één type lichtgewicht paneel waarbij de weerstand tegen schokgolf en ballistische effecten bepaald diende te worden. Het paneel, waarvan de geschiktheid voor toepassing in de offshore als bescherming tegen gasexplosies is aangetoond, is niet ontworpen om bescherming te bieden tegen schokgolven en ballistische effecten. Het huidige onderzoek moet uitwijzen in hoeverre het paneel daarvoor geschikt is. Met het verkregen eindresultaat kunnen specifieke toepassingsgebieden en/of verbeteringscondities aangegeven worden. Voor toepassingsgebieden kan onder andere gedacht worden aan afscherming c.q. compartimentering van munitie opslagplaatsen bij out of area operaties of lichte bepantsering van EOD of brandweervoertuigen.



Figuur 1: Paneel in de opstelling voor de schokgolf simulator (350139-17).

2 Proefopzet

2.1 Algemeen

In totaal zijn voor het onderzoek vijf panelen gemaakt. Vier panelen zijn gebruikt om de dynamische sterkte te bepalen bij de belasting van een schokgolf. Eén paneel is gebruikt voor het bepalen van de weerstand tegen ballistische inslag. In de volgende paragrafen wordt de proefopzet nader beschreven. Tabel 1 geeft een overzicht van alle uitgevoerde proeven, de beschreven belasting is de reflectie druk.

Tabel 1: Overzicht van de uitgevoerde proeven.

Paneel	Uitgevoerde proeven
1	Drie proeven, oplopend een belasting van 35, 70 en 140 kPa
2	Twee proeven, oplopend een belasting van 70 en 140 kPa
3	Eén proef met een belasting van 140 kPa
4	Drie proeven, twee maal een belasting van 35 kPa en één maal 70 kPa
5	Bepalen van ballistische weerstand

2.2 Panelen

In totaal zijn vijf (sandwich)panelen gemaakt door de firma Fokker, conform slp-tekening HA 215-002. De kern van de panelen waren apart gefabriceerd en geleverd aan Fokker door de firma Zortech. De kern bestond uit een honingraatstructuur welke is vervaardigd van in hars gedrenkte papier. De honingraatstructuur is gevuld met een zeer fijn poeder welke omschreven wordt als een keramisch poeder. De exacte samenstelling van het poeder wil de firma Zortech niet weggeven en is daardoor niet bekend. De afmetingen van de panelen waren: breed 1100 mm, hoog 900 mm en dik 62 mm.

Alle panelen hadden dezelfde opbouw en bestonden uit (zie figuur 2):

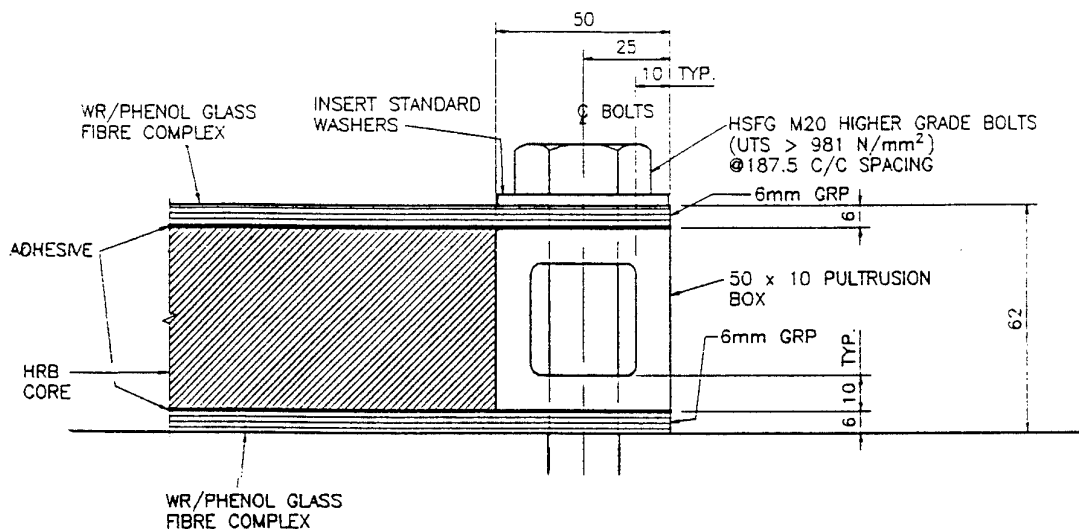
- Bovenlaag = Tien lagen glasvezel + Phenol hars
- Hechting = Polyurethaan lijmfilm
- Kern = Zortech (prefabricated filled honeycomb)
- Hechting = Polyurethaan lijmfilm
- Onderlaag = Tien lagen glasvezel + Phenol hars

Materiaal gegevens van de glasvezel + phenol hars lagen zijn volgens de specificaties van de fabrikant:

- Treksterkte f_t = 175,2 MPa
- Elasticiteits-modulus E = 8661,2 MPa
- Breukrek ϵ_{fail} = 2,3%

Om het paneel te kunnen bestigen is in het paneel naast de kern en tussen boven en onderlaag was een randprofiel aangebracht. Het profiel, 'glassroving' genaamd, bestond uit een van glasvezel gewapende polyesterhars gepultrudeerde koker van 50 x 50 x 10 mm.

De panelen hebben een massa van circa 39 kg.



Figuur 2: Opbouw van het paneel.

2.3 Beproevingsmethode voor bepaling dynamische sterkte

Om de dynamische sterkte van de panelen te onderzoeken zijn de panelen belast met een schokgolf. De schokgolf, een instantane drukverhoging, werd opgewekt in een schokgolfsimulator. De schokgolfsimulator is een lange konisch verlopende ronde pijp met een begindiameter van 0,3 meter en een einddiameter van 2 meter. De totale lengte van de simulator bedraagt 65 meter. De schokgolf wordt opgewekt door in het driver gedeelte van de simulator een opgesloten acetyleen zuurstof mengsel te ontsteken. Aan het uiteinde van de simulator is een stalen masker geplaatst waarop de panelen bevestigd waren.

Om de respons van de panelen onder verschillende omstandigheden te onderzoeken zijn op bijna alle panelen meerdere testen uitgevoerd. Paneel een en twee zijn opeenvolgend belast om de mogelijke invloed van een eerdere belasting op de stijfheid van het paneel te onderzoeken. Paneel drie is eenmalig belast. Paneel vier is eerst twee maal aan eenzelfde lage belasting blootgesteld en daarna aan een hogere belasting.

Om een mogelijke delaminatie in het paneel vast te stellen is voor elke proef de eigenfrequentie van het paneel vastgesteld. Een mogelijke delaminatie werd vastgesteld door op het midden van het paneel te tikken en daarbij het frequentie-

spectrum van de respons te bepalen. Indien de plaat was gedelamineerd trad er een verschuiving op in het frequentie-spectrum.

Bevestiging

Vanwege de gelijkheid met de praktijk (snelle en demonteerbare bevestiging) waren de panelen gebout op een stalen masker welke bevestigd was achter de schokgolfsimulator. Om een zo groot mogelijke vervorming van het paneel te krijgen waren de panelen alleen op de twee korte zijden met behulp van vijf M20 bouten op het masker bevestigd. Voor de bevestiging waren gaten in het paneel geboord door het randprofiel, 25 mm uit de rand. De panelen hadden hierdoor een support-lengte van 1,05 meter.

2.4 Beproevingsmethode voor bepaling ballistische sterkte

Daar de toegepaste panelen niet ontworpen zijn om een kogel inslag te weren was gekozen om de ballistische sterkte van de panelen alleen te bepalen voor de inslag van een granaatscherf. Een standaard test methode om de weerstand tegen fragmenten te bepalen is door de limietsnelheid (V50 waarde) van een FSP (fragment simulation projectiel) te bepalen. De V50 waarde wordt gedefinieerd als de gemiddelde snelheid van drie snelheden waarbij het monstermateriaal perforeert en drie snelheden waarbij het projectiel gestopt wordt. De snelheden moeten liggen binnen een interval van 40 m/s. De FSP's hadden een massa van 1,1 gram en zijn verschoten met een 7,62 mm sabot.

2.5 Instrumentatie

Om de vervorming en de weerstand en eventueel de relatie tussen beide ten gevolge van de aangebrachte dynamische belasting vast te stellen zijn de panelen beïnstumenteed met in totaal 19 opnemers.

Deze 19 opnemers zijn onder te verdelen in 2 druk-, 8 rekstrook-, 5 verplaatsings- en 4 versnellingsopnemers.

Voor de registratie van de aangeboden druk is gebruik gemaakt van drukopnemers van het merk Druck, type PDCR 200. Drukopnemer 1, aangeduid met D1, was geplaatst in meetplaats 29 van de simulator, 1,5 meter voor het masker c.q. paneel. D1 registreerde de invallende (side-on) druk. Drukopnemer 2, aangeduid met D2, was geplaatst in het masker onder het paneel en registreerde de gereflecteerde (face-on) druk.

De vervorming van het paneel is geregistreerd met behulp van rekstrookjes van het merk Micro Measurement, type CEA-13-250 UW-120. De rekstrookjes zijn op de panelen gelijmd met speciale twee componenten epoxy lijm van het merk Micro

Measurement, type AE-10. In figuur 3 zijn de posities van de rekstrookjes weer-gegeven. De rekstrookjes zijn aangeduid met de letter S en zijn genummerd van 1 tot en met 8, waarbij de even nummers aan de belaste zijde zitten en de oneven nummers aan de onbelaste zijde.

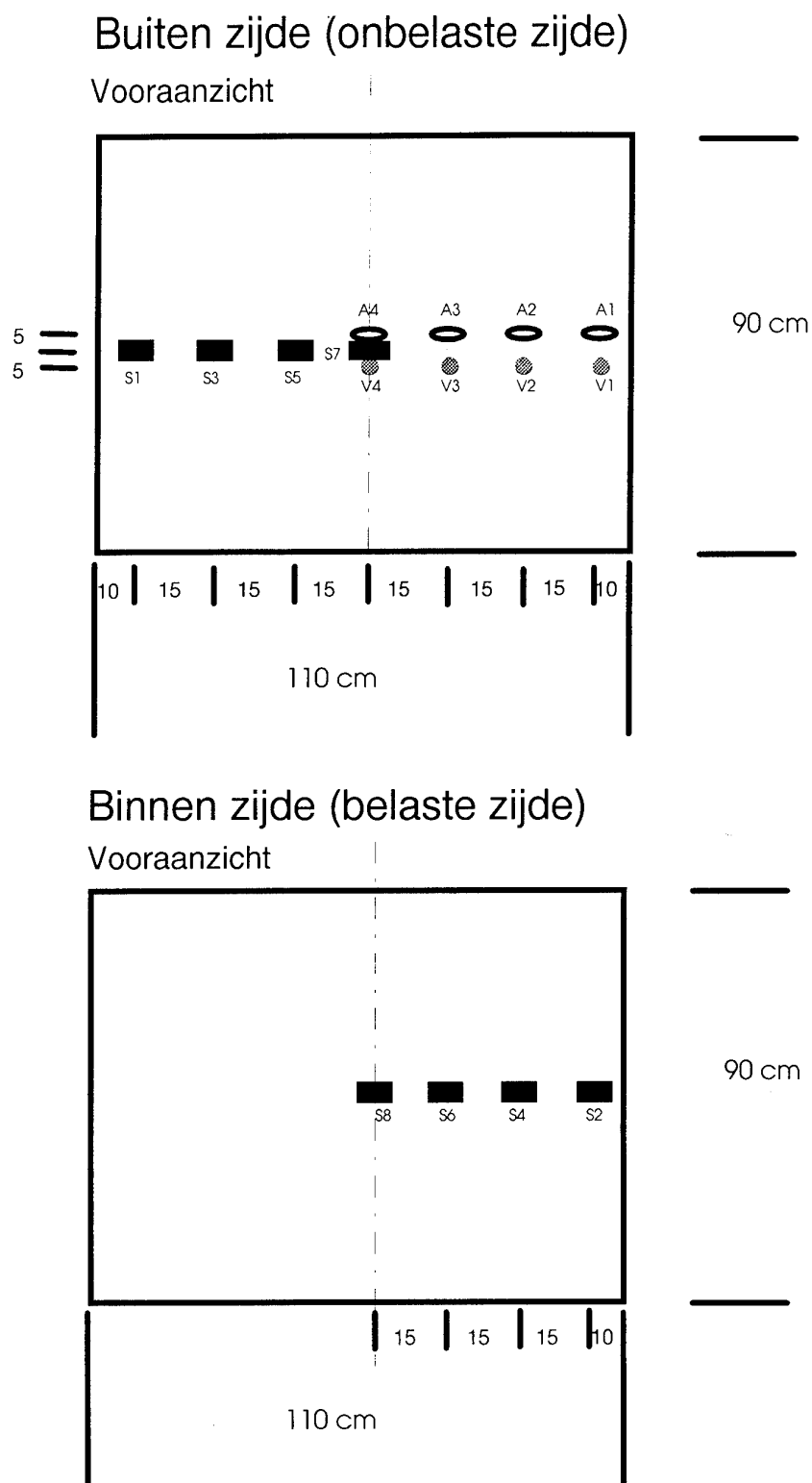
De uitbuiging van het paneel is op vier plaatsen gemeten met contactloze optische verplaatsingsopnemers van het merk Micro Epsilon, type LD 1605 - 100 / 200. De posities van de verplaatsingsopnemers aangeduid als V1 tot en met V4 zijn weer-gegeven in figuur 3.

Alle opnemers waren geplaatst op een hiervoor speciaal vervaardigd statief waarbij geen contact met de simulator werd verkregen. De verplaatsing van de simulator ten opzichte van het statief is vastgesteld met een contactloze ver-plaatsingsopnemer (V5) welke geplaatst was op het statief rechts naast het paneel op dezelfde hoogte als de verplaatsingsopnemers.

Versnellingsmetingen zijn uitgevoerd op vier posities. De posities van de versnel-lingsopnemers aangeduid als A1 tot en met A4 zijn weergegeven in figuur 3.

Tijdens de proeven is één versnellingsopnemers kapot gegaan waardoor op deze positie twee verschillende typen opnemers zijn toegepast. Toegepast voor A1 en A2 zijn versnellingsopnemers van het merk Endevco, type 2262. Voor A3 en A4 zijn versnellingsopnemers toegepast van het merk Bruel & Kjaer, type 4375. Na het tweede paneel is voor A3 een versnellingsopnemer ingezet van het merk Endevco, type 7270.

Alle opnemers zijn geconditioneerd en de signalen geregistreerd met een moduler data acquisitie systeem van het merk BSI, type Digistar II en III. De toegepaste sample snelheid bij het eerste en tweede paneel bedroegen voor de drukopnemers 1 μ s. en voor de overige kanalen 10 μ s. Voor paneel drie en vier is voor alle ka-nalen één sample snelheid van 5 μ s toegepast.



Figuur 3: Opnemersposities op panelen.

3 Resultaten

3.1 Algemeen

De resultaten van de experimenten zijn beschreven in verschillende paragrafen. Paragraaf 3.2 beschrijft de praktische uitwerking van de schokgolfbelasting op de panelen. Paragraaf 3.3 geeft een beschrijving en een onderbouwing van de meetresultaten. De resultaten van de ballistische proeven worden beschreven in paragraaf 3.4.

3.2 Beschrijving van de uitwerking van de schokgolfbelasting op de panelen

Paneel 1

- Test 1:* Belasting 38 kPa. Geen delaminatie.¹ Geen zichtbare schade aan paneel.
- Test 2:* Belasting 71 kPa. Paneel gedelamineerd. Geen zichtbare schade aan paneel.
- Test 3:* Belasting 143 kPa. Buitenste glasvezelplaat over de onderste en bovenste bevestigingsbouten heen getrokken (zie figuur 4). Kern verder gedelamineerd, klein beetje poeder uit de plaat gekomen.

Paneel 2

- Test 1:* Belasting 69 kPa. Na de proef paneel gedelamineerd. Geen zichtbare schade aan paneel.
- Test 2:* Belasting 160 kPa. Buitenste glasvezelplaat door de bevestigingsbouten gescheurd en eraf gevlogen. Binnenste glasvezelplaat op het masker blijven zitten. De kern was geheel door midden gescheurd waarbij de papieren honingraatstructuur wel op de glasvezelplaten is blijven zitten. Het poeder was zeer ver verspreid achter het paneel (zie figuur 5).

Paneel 3

- Test 1:* Belasting 143 kPa. Het paneel is als geheel op het masker blijven zitten. Veel zijden van zowel binnen als buiten glasvezelplaat zijn losgelaten van de glasvezel randprofiel, klein beetje poeder uit de plaat gekomen (zie figuur 6).

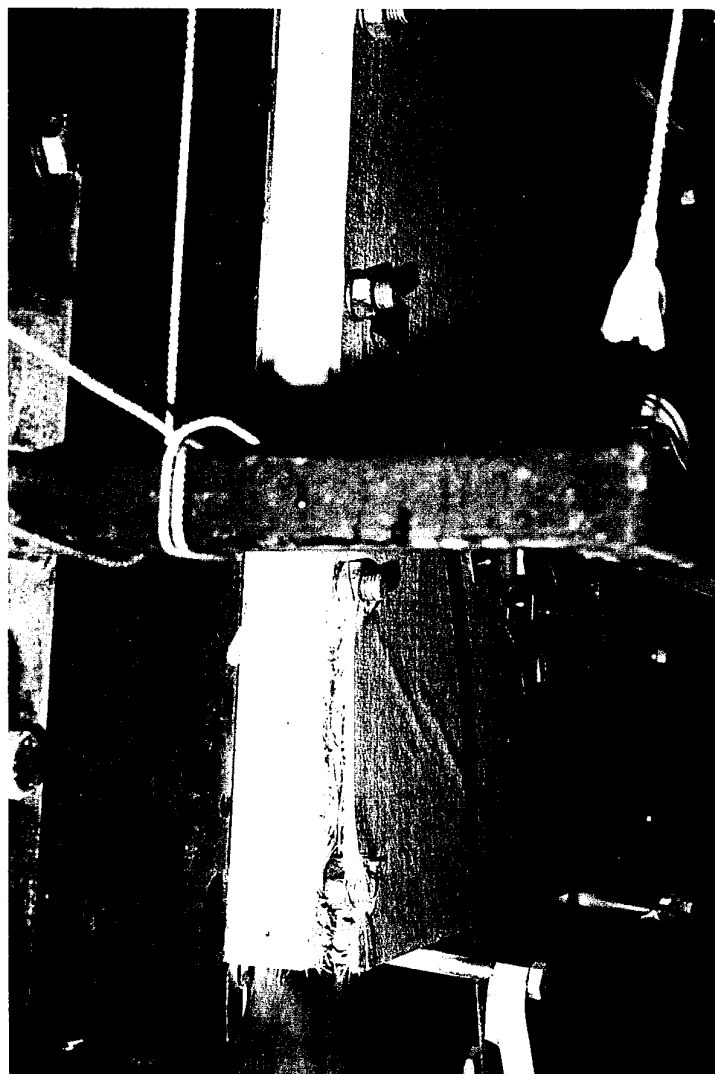
¹ Delaminatie is vastgesteld door het frequentie-spectrum van de respons van de plaat op een lichte tik in het midden te bepalen. Indien de plaat is gedelamineerd treedt er een verschuiving op in het frequentie-spectrum.

Paneel 4

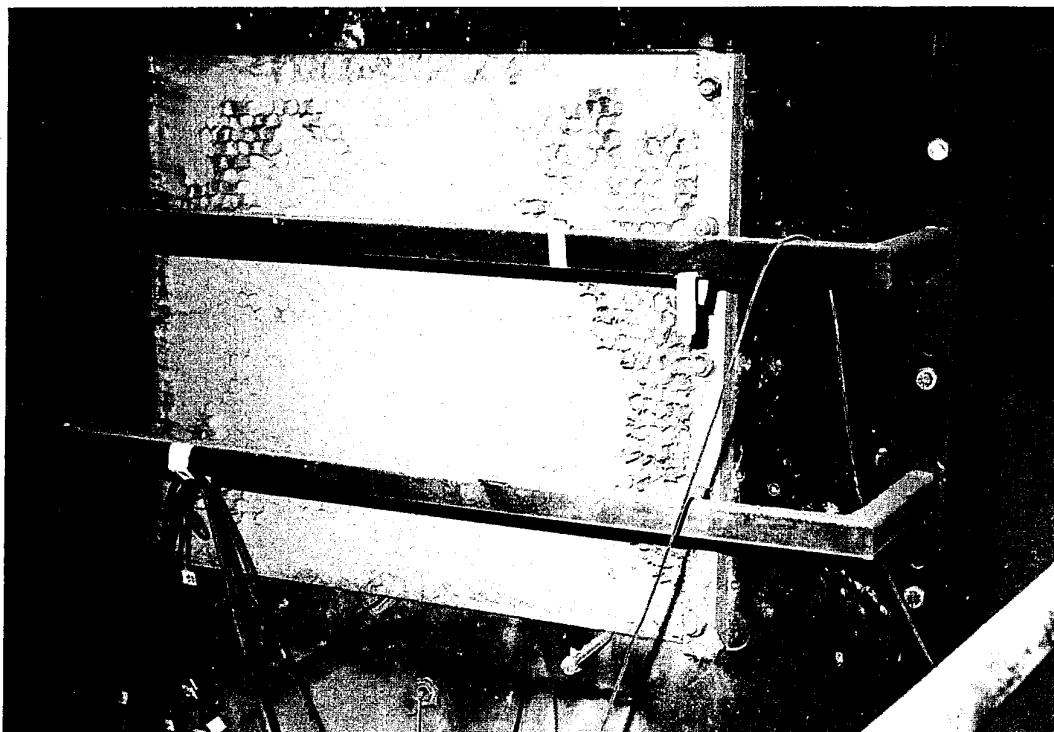
Test 1: Belasting 35 kPa. Geen delaminatie. Geen zichtbare schade aan paneel.

Test 2: Belasting 31 kPa. Geen delaminatie. Geen zichtbare schade aan paneel.

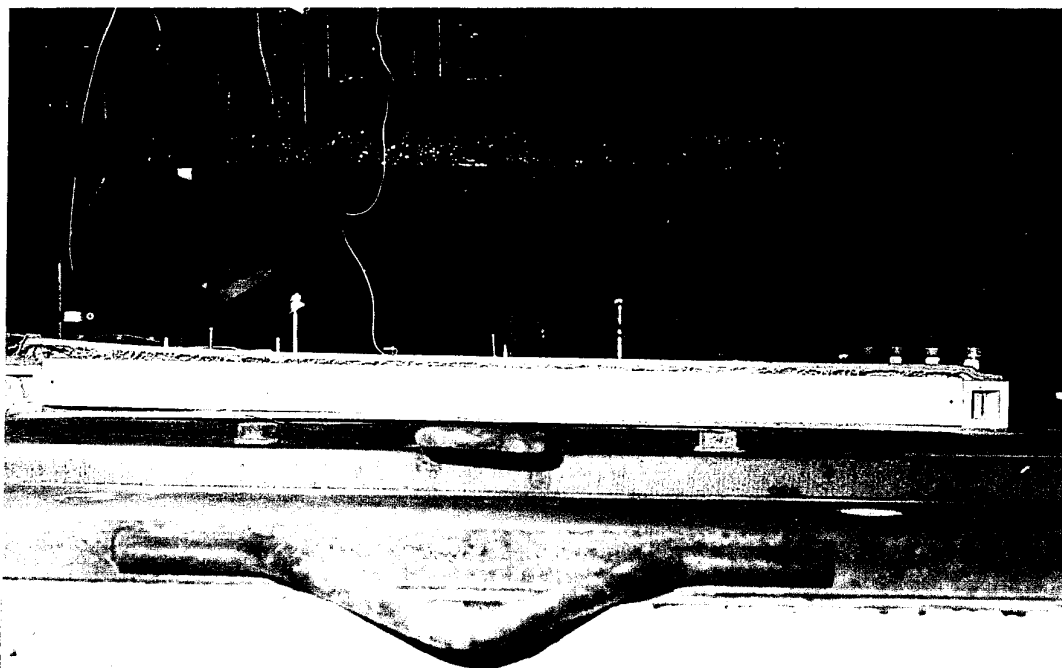
Test 3: Belasting 67 kPa. Paneel gedelamineerd. Geen zichtbare schade aan paneel



Figuur 4: Schade aan paneel 1: glasvezelplaat is over bevestigingsbouten getrokken (350139-06).



Figuur 5: Schade aan paneel 2 na de tweede test: buitenste paneel is totaal losgekomen. Omgeving is helemaal wit door het vrijgekomen poeder uit de kern (350139-10).



Figuur 6: Schade aan paneel. Aanzicht vanaf de bovenzijde paneel (350139-14).

3.3 Resultaten metingen

De verkregen data van alle experimenten zijn verwerkt tot grafische figuren en weergegeven in bijlage A tot en met D. In elke bijlage zijn de resultaten, oplopend per proef, per categorie metingen weergegeven. Vanwege een verschil in opnametijd zijn de resultaten weergegeven met een tijdas van 60 of van 100 ms. Bij de proeven paneel 1 test 3, paneel 2 test 2 en paneel 3 test 1 is vanwege de lang durende belasting de resultaten op twee verschillende tijdsassen weergegeven. Van 0 tot 100 ms voor een gedetailleerd beeld van de beginfase en van 0 tot 300 ms voor het volledige verloop van de belasting.

3.3.1 Maximale gemeten waarden

Een overzicht van de gemeten maximale waarden zijn in tabelvorm gegeven in tabel 2.

Tabel 2: Overzicht van de geregistreerde maximale waarden.

Opnemer	Paneel 1			Paneel 2		Paneel 3	Paneel 4		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 1	Test 1	Test 2	Test 3
D1 [kPa]	17	30	57	30	63	57	14	14	29
D2	38	71	143	70	160	143	35	31	67
S1 [μ rek]	50	-1430	-1200	-970	-800	-1150	173	145	-1110
S2	200	3000	3495	2655	2300	3340	118	109	2160
S3	285	1290	2300	1410	2600	2475	271	217	1570
S4	-300	-1460	-1730	-1400	-2700	-1475	-172	-138	-1300
S5	355	--	--	2660	3800	3450	364	291	2045
S6	-645	-835	-2175	-735	--	-1350	-249	-204	-654
S7	--	--	--	2650	5000	--	445	347	2500
S8	-295	-330	-1800	-395	-3500	-1375	-270	-217	-354
V1 [mm]	3.9	8.6	25.8	10	35	22.5	4.4	3.3	8.9
V2	5.8	21.3	50.5	24.9	80	46	6.1	4.5	22.5
V3	--	--	70.5	31.2	>80	66.5	6.7	4.7	31
V4	7.2	--	--	41.7	>80	60.8	7.1	5.2	33.7
V5	--	--	>4	3.2	>4	>4	2.9	2.4	>4
A1 [m/s^2]	--	--	6846	900	3000	--	400	380	886
A2	982	2040	4411	1896	5200	3395	832	913	1025
A3	2275	4743	8500	4250	15900	7250	1460	1700	3690
A4	1710	4263	8500	4290	13300	--	1690	1725	4590

-- Geen meting

Uit de maximale waarden blijkt dat de belastinggeschiedenis geen invloed heeft op de respons van de plaat bij een volgende belasting zolang ten gevolge van eerdere belastingen geen schade is veroorzaakt. Vergelijk bijvoorbeeld de respons van paneel 1 - test 2, paneel 2 - test 1 en paneel 4 - test 3. Zodra echter schade is opgetreden bij een voorafgaande belasting is er uiteraard wel sprake van invloed van de belastinggeschiedenis. De weerstand van de plaat is gereduceerd, waardoor de doorbuiging bij een bepaalde belasting groter zal zijn. Vergelijk bijvoorbeeld paneel 2 - test 2 en paneel 3 - test 1.

De mate van eerder ontstane schade is ook van belang. Indien deze beperkt is zijn de verschillen in respons niet zo groot. vergelijk bijvoorbeeld paneel 3 - test 1 en paneel 1 - test 3.

3.3.2 Verwerking signalen tot weerstand-vervormingscurve

Voor tweezijdig vrij opgelegde betonplaten is door TNO-PML een testmethode bedacht waarmee de rotatiecapaciteit en de weerstand-vervormingscurve van deze platen onder een schokgolfbelasting bepaald kunnen worden. Voor deze platen werkte de methode naar tevredenheid [1]. Van de huidige serie proeven is gebruik gemaakt om de toepasbaarheid van de testmethode voor gelamineerde kunststof panelen te toetsen. Indien de methode geschikt blijkt kan tevens de respons van de kunststofpanelen op een schokgolfbelasting beter geanalyseerd worden.

De testmethode is uitgebreid beschreven in [1]. Hier wordt daarom volstaan met de volgende beknopte beschrijving. Met behulp van een massa-veer-systeem kan een evenwichtsvergelijking worden opgesteld voor de buiging van platen. Uit deze evenwichtsvergelijking blijkt dat op elk tijdstip de belasting gelijk is aan de som van de traagheidskrachten en de weerstand van de plaat tegen vervorming. De weerstand van de plaat is dus gelijk aan het verschil tussen de belasting en de traagheidskrachten. De belasting kan direct gemeten worden. De traagheidskrachten kunnen worden bepaald met behulp van de versnelling en de doorbuigvorm. Nadat op deze manier de weerstand als functie van tijd is gevonden, kan deze gerelateerd worden aan de gemeten doorbuiging. Dit is de zogenaamde weerstand-vervormingscurve.

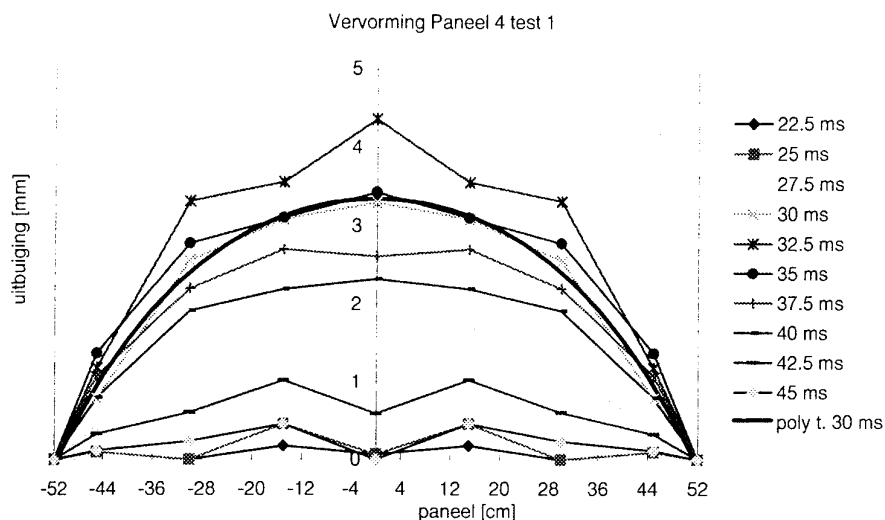
In het volgende zal voor een tweetal testen de weerstand-vervormingscurve bepaald worden.

3.3.2.1 Weerstand-vervormingscurve voor plaat 4 - test 1

De bepaling van de weerstand-vervormingscurve zal hier stapsgewijs beschreven worden.

Stap 1 Bepaal uit de gemeten verplaatsingen een representatieve doorbuigvorm

Daartoe is op een aantal tijdstippen de verplaatsing als functie van de positie x uitgezet, nadat de starre verplaatsing geëlimineerd was. Dit leverde figuur 7 op. Enige toelichting op deze figuur is waarschijnlijk wel nodig. Er lijkt niet duidelijk één representatieve vorm te zijn. Daar is een aantal duidelijk aanwijsbare oorzaken voor. Ten eerste is er over de gemeten signalen behoorlijk wat ruis. Een afleesfout is daardoor snel gemaakt. Ten tweede is het bekend dat een plotseling belaste constructie tijd nodig heeft om zijn buigvorm aan te nemen (zie [2]). De vervorming begint bij de oplegging en breidt zich uit naar het midden.



Figuur 7: Doorbuiging van plaat 4 in test 1.

Met behulp van een vierde orde polynoom is een curve-fit gemaakt van de doorbuiging op tijdstip $t = 30$ ms. Dit leverde de volgende functie op voor de doorbuiging op dit tijdstip:

$$w(x) = 3,35 - 9,33 \cdot x^2 - 12,308 \cdot x^4$$

met x in m en w in mm.

Deze benadering voor de doorbuiging op $t = 30$ ms is eveneens weergegeven in figuur 7. Het blijkt dat de gevonden functie een redelijke benadering is. Deze doorbuigvorm zal daarom gebruikt worden voor de beschrijving van het globale gedrag van de plaat tijdens de hele belastingsfase. Uit figuur 7 is duidelijk dat dit niet helemaal correct is. Met name in de inloophase vertoont de plaat een afwijkend gedrag. De hierdoor geïntroduceerde fout is echter onbelangrijk voor de resultaten ten aanzien van het globale gedrag van de plaat.

De vormfunctie wordt gegeven door:

$$\phi(x) = \frac{w(x)}{w(0)} = 1 - 2,785 \cdot x^2 - 3,674 \cdot x^4$$

met x in m en w in mm.

Stap 2 Splits de gemeten verplaatsingen op in een starre verplaatsing en een doorbuiging

De gemeten verplaatsing op een willekeurige positie x is de som van een starre verplaatsing en een doorbuiging. De starre verplaatsing is uiteraard voor iedere positie hetzelfde. Deze is gelijk aan de gemeten verplaatsing bij de inklemming, V5. De doorbuiging op iedere positie is gerelateerd aan de doorbuiging in het

midden van de plaat door de hierboven bepaalde vormfunctie. Mathematisch is dit als volgt weer te geven:

$$v(x, t) = v_{star}(t) + w(x, t) = v_{star}(t) + w(0, t) \phi(x) \quad (1)$$

Zo kan een set van vier vergelijking opgesteld worden, want op vier posities is de verplaatsing gemeten. Deze set vergelijkingen wordt gegeven door:

$$v(0,45, t) = v_{star}(t) + 0,285 \cdot w(0, t)$$

$$v(0,30, t) = v_{star}(t) + 0,720 \cdot w(0, t)$$

$$v(0,15, t) = v_{star}(t) + 0,935 \cdot w(0, t)$$

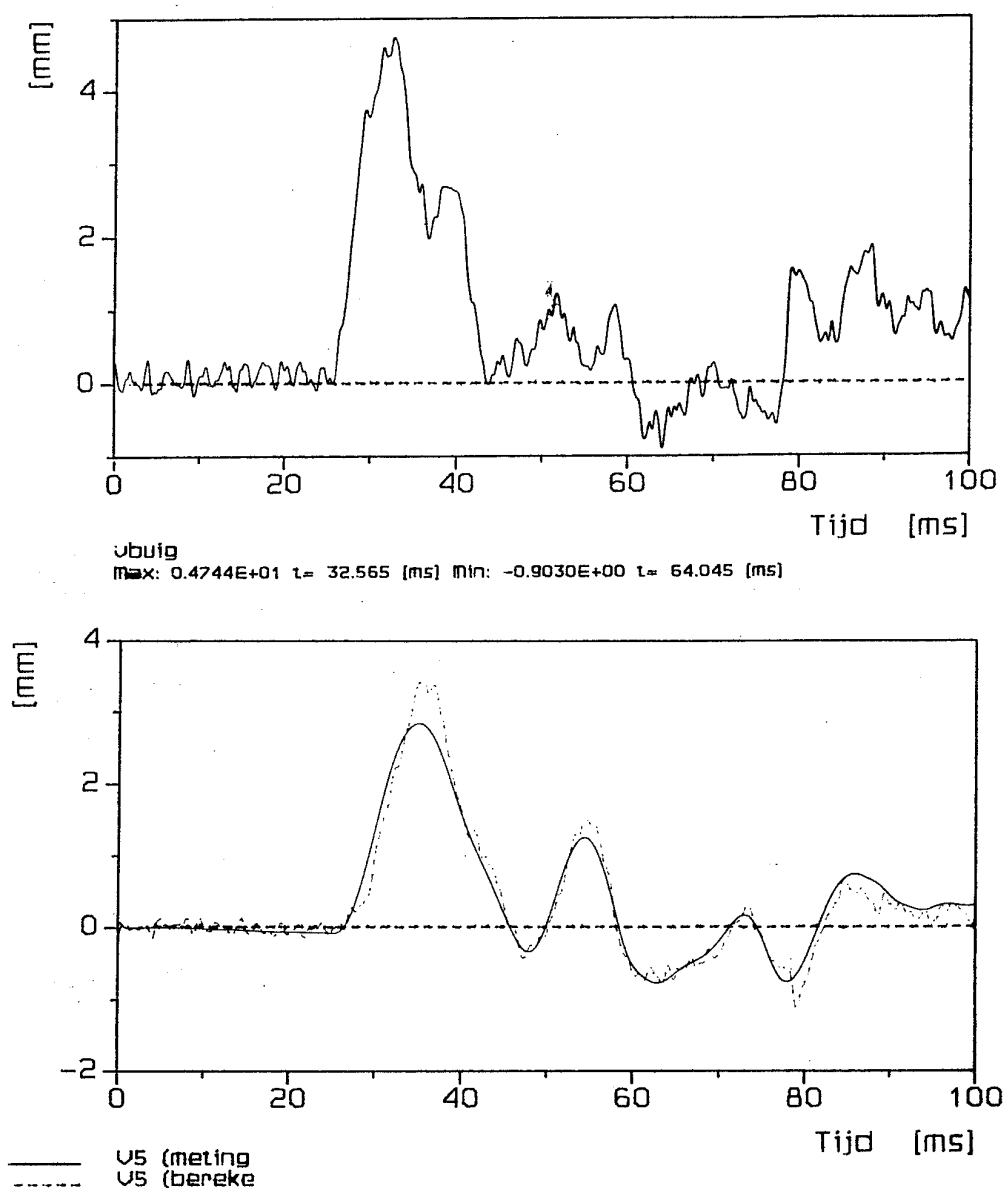
$$v(0, t) = v_{star}(t) + 1,000 \cdot w(0, t)$$

Met behulp van de kleinste kwadraten methode [3] kan dit stelsel opgelost worden. De starre verplaatsing en de doorbuiging in het midden van de plaat worden gegeven door:

$$v_{star}(t) = 1,374 \cdot v(0,45, t) + 0,289 \cdot v(0,3, t) - 0,251 \cdot v(0,15, t) - 0,412 \cdot v(0, t)$$

$$w(0, t) = -1,505 \cdot v(0,45, t) - 0,052 \cdot v(0,3, t) + 0,670 \cdot v(0,15, t) + 0,886 \cdot v(0, t)$$

De aldus bepaalde $w(0, t)$ en $v_{star}(t)$ zijn weergegeven in figuur 8. De berekende v_{star} wordt in deze figuur vergeleken met de gemeten verplaatsing in V5. De overeenkomst tussen beide is goed. Dit geeft aan dat de opsplitsing op een goede manier is uitgevoerd. Alleen bij het maximum is de berekende starre verplaatsing iets te klein. Deze afwijking is het gevolg van afwijkingen van de doorbuigvorm ten opzichte van de globale doorbuigvorm. Waarschijnlijk is hierdoor ook een geringe afwijking in de doorbuiging aanwezig. De maximale uitbuiging is mogelijk iets kleiner dan berekend is.



Figuur 8: a. Globale doorbuiging in het midden van plaat 4 - test 1;
 b. Vergelijking van gemeten en berekende starre verplaatsing.

Stap 3 Splits op dezelfde manier de versnelling op in een versnelling ten gevolge van de starre beweging en een versnelling van de doorbuiging

De versnelling is op dezelfde manier over de plaat verdeeld als de doorbuiging. De versnelling kan dus op dezelfde manier opgesplitst worden:

$$a_{star}(t) = 1,374 \cdot a(0,45,t) + 0,289 \cdot a(0,3,t) - 0,251 \cdot a(0,15,t) - 0,412 \cdot a(0,t)$$

$$a_b(0,t) = -1,505 \cdot a(0,45,t) - 0,052 \cdot a(0,3,t) + 0,670 \cdot a(0,15,t) + 0,886 \cdot a(0,t)$$

Stap 4 Bepaal de traagheidskrachten

De traagheidskrachten zijn gelijk aan het produkt van massa en versnelling. De versnelling is opgesplitst in een bijdrage van de starre beweging en een bijdrage van de buiging. De bijbehorende massa's zijn verschillend. Voor de traagheid van de starre beweging moet de volledige massa M van de plaat in rekening gebracht worden. Voor de traagheid van de buigbeweging is de effectieve massa gelijk aan 0,82 maal de totale massa, uitgaande van de versnelling in het midden. De load-mass-factor $K_{LM} = 0.82$ volgt uit:

$$K_{LM} = \frac{K_M}{K_L} = \frac{\int_{-0.525}^{0.525} \phi^2(x) dx}{\int_{-0.525}^{0.525} \phi(x) dx} \quad (2)$$

waarin

K_{LM} = Load-mass factor

K_M = Mass factor

K_L = Belastingsfactor

De traagheidskrachten $I(t)$ zijn dus gelijk aan:

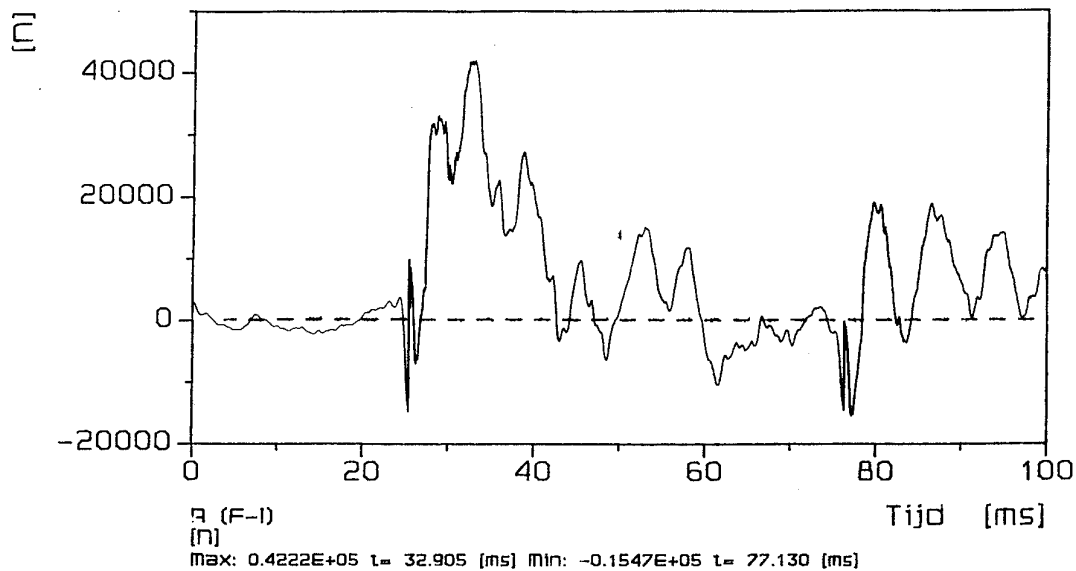
$$I(t) = M \cdot a_{star}(t) + K_{LM} \cdot M \cdot a_b(0,t) \quad (3)$$

Stap 5 Bepaal de weerstand van de plaat als functie van de tijd

De weerstand van de plaat volgt uit het krachtenevenwicht en is gelijk aan het verschil tussen belasting en traagheidskrachten. De totale belasting volgt uit het produkt van de druk en het oppervlak ($A = 0,8 \text{ m}^2$). De druk kan namelijk worden beschouwd als gelijkmatig verdeeld. De traagheid is in de vorige stap al bepaald. De weerstand $R(t)$ wordt dus gegeven door:

$$R(t) = A \cdot p(t) - I(t) \quad (4)$$

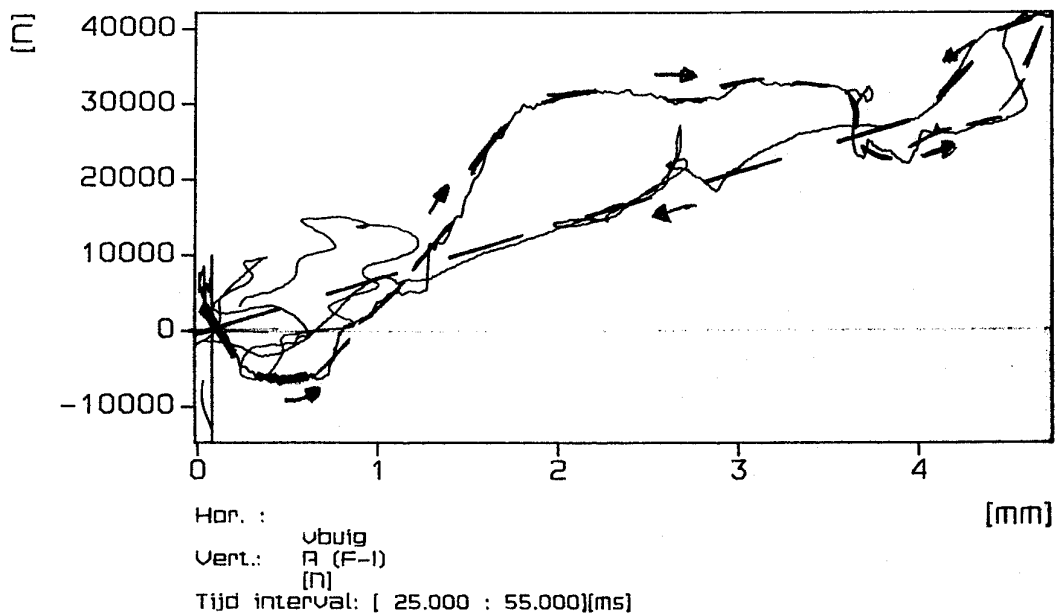
De aldus gevonden weerstand als functie van de tijd is weergegeven in figuur 9.



Figuur 9: Weerstand van plaat 4 - test 1.

Stap 6 Bepaal de weerstand-vervormingscurve

Relateer hiertoe de weerstand $R(t)$ aan de doorbuiging $w(0,t)$. Het resultaat hiervan voor test 1 op plaat 4 is gegeven in figuur 10. Tevens is met een stippellijn het globale gedrag weergegeven, zoals uit de figuur is te lezen.



Figuur 10: Weerstand-vervormingscurve van plaat 4 - test 1.

De vraag is nu hoe deze figuur geïnterpreteerd moet worden. De verkregen curve voldoet niet geheel aan de verwachtingen. De plaat was na de proef nog on-

beschadigd en vertoonde geen blijvende vervorming. Op basis van een dergelijk elastisch gedrag wordt een lineaire relatie verwacht tussen weerstand en deflectie; en wel dezelfde voor belasting als ontlasting. De gevonden stijgende curve lijkt echter meer op dat van een elastisch-plastisch gedrag. De ontlastende curve voldoet daarentegen wel aan de verwachting van een lineair elastisch gedrag. Het is deze ontlastende curve waarvan gedacht wordt dat die het globale gedrag van het paneel goed weergeeft. In de opgaande curve wordt het gedrag teveel verstoord door hoogfrequente trillingen in de respons van de plaat. Dergelijke hoogfrequente trillingen zijn met name in de beginfase merkbaar aanwezig. Uit de vervorming van de plaat op diverse tijdstippen (zie figuur 7) kan worden waargenomen dat gedurende een groot deel van de uitbuigende fase, de deflectie in het midden van de plaat achter blijft bij de deflectie in overstemming met de globale uitbuiging. Tegelijkertijd is de weerstand in de plaat vanwege de aanwezigheid van hogere eigenfrequenties hoger dan de weerstand die hoort bij de globale vervorming, na eerst een afwijking in negatieve zin te hebben gehad (zie figuur 9). In de weerstand-deflectie-curve zien we dan ook initieel een negatieve fase te zien die gevolgd wordt door een snel stijgende tak. Om daarna toch op het primaire doorbuigingsgedrag uit te komen moet de doorbuiging ten opzichte van de weerstand een inhaalslag maken. Dit is de horizontale tak in de uitbuigingsfase. De curve schiet zelfs weer even onder de globale curve door.

De terugverende curve geeft het globale buigingsgedrag van de plaat beter weer. In deze fase is de eerste eigentrilling dominant en zijn de hogere eigentrillingen nog slechts aanwezig als geringe verstoringen. Een aanwijzing voor de correctheid van deze stelling is het feit dat de opgaande curve rond deze teruggaande curve slingert.

Bij maximale vervorming wijkt de gevonden curve af van de lineaire. Dit komt waarschijnlijk nog door de hogere eigenfrequenties.

De stijfheid die afgelezen kan worden van de teruggaande tak van de weerstand-vervormingscurve is $7,1 \cdot 10^6$ N/m. Deze waarde ligt tussen de theoretische waarden voor een opgelegde plaat en een volledig ingeklemde plaat in, welke gegeven worden door:

$$k_e = \frac{384EI}{5L_s^3} = 4,884 \cdot 10^6 \text{ N / m} \quad \text{opgelegd} \quad (5)$$

$$k_e = \frac{384EI}{L_s^3} = 24,42 \cdot 10^6 \text{ N / m} \quad \text{ingeklemd} \quad (6)$$

waar:

$$I = 2B \int_{\frac{25}{62}h}^{\frac{h}{2}} z^2 dz = \frac{28332}{714984} bh^3 = 8,4996 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; h = 62 \text{ mm}; b = 0.9 \text{ m};$$

$$E = 8,6612 \text{ GPa}; \text{ and } L_s = 1,05 \text{ m}.$$

Voor de ingeklemde situatie is bij deze berekening aangenomen dat het weerstandsmoment in deze doorsnede hetzelfde is. Dat is echter niet het geval. Het paneel is slechts op vijf posities ingeklemd en niet over de hele breedte. Daardoor zal de stijfheid lager zijn dan berekend voor volledig ingeklemd. Omdat wel een moment ontwikkeld kan worden is daarentegen de stijfheid wel hoger dan berekend voor een opgelegde plaat. Het resultaat van de proef is dus in overeenstemming hiermee.

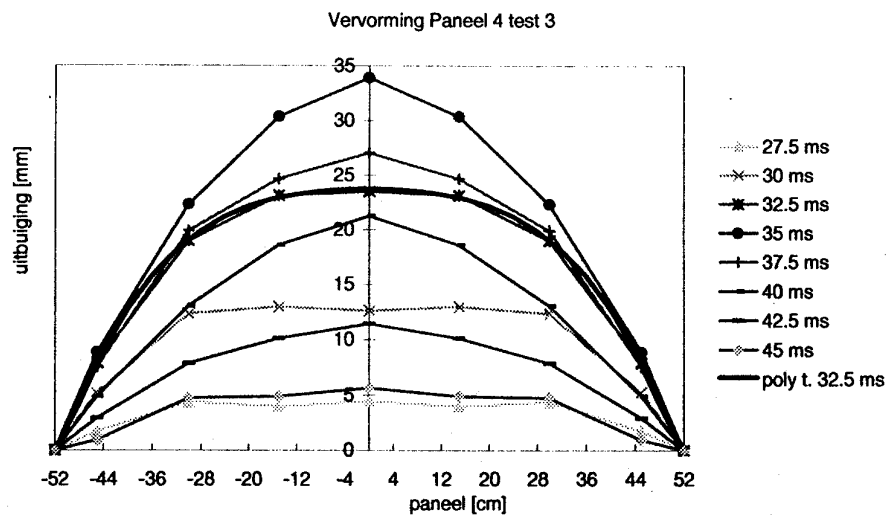
3.3.2.2 Weerstand-vervormingscurve voor plaat 4 - test 3

Op dezelfde wijze als voor test 1 is ook voor test 3 de weerstand-vervormingscurve bepaald. Dat wil zeggen dat eerst de doorbuigvorm van de plaat is bepaald, zoals weergegeven in figuur 11. De doorbuiging op tijdstip $t = 32,5$ ms kan met de volgende vierde graads polynoom benaderd worden.

$$w(x) = 2373 - 3076 \cdot x^2 - 235 \cdot x^4$$

Deze polynoom is ter vergelijking ook in figuur 11 weergegeven (de getrokken lijn). Op basis van deze polynoom is de vormfunctie bepaald, die voor de verdere verwerking van de signalen gebruikt is. Deze vormfunctie wordt gegeven door:

$$\phi(x) = 1 - 1,296 \cdot x^2 - 9,903 \cdot x^4$$



Figuur 11: Doorbuiging van plaat 4 in test 3.

Het stelsel vergelijkingen voor het opsplitsen van de verplaatsing wordt dan gegeven door:

$$v(0,45,t) = v_{star}(t) + 0,331 \cdot w(0,t)$$

$$v(0,30,t) = v_{star}(t) + 0,803 \cdot w(0,t)$$

$$v(0,15,t) = v_{star}(t) + 0,966 \cdot w(0,t)$$

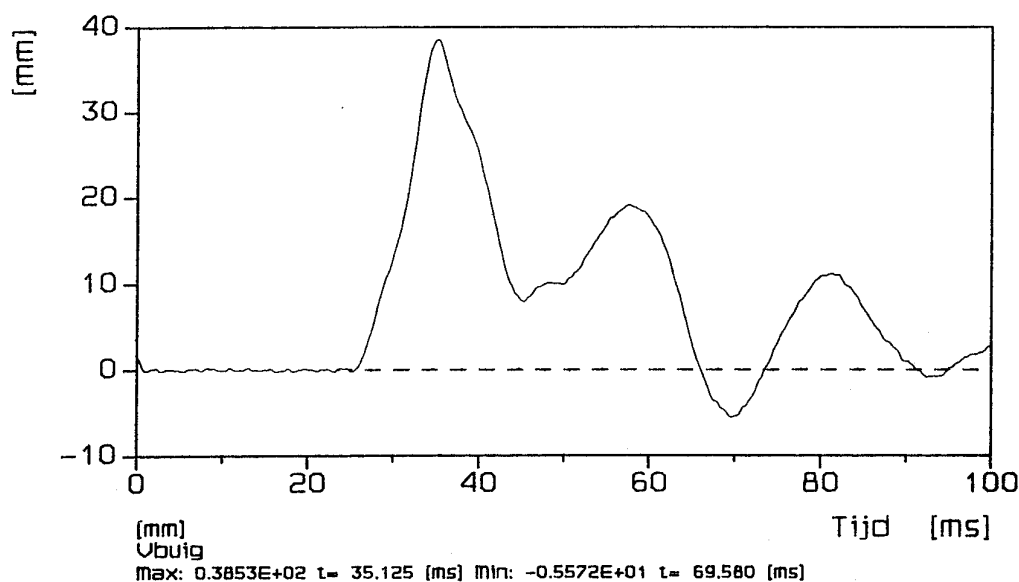
$$v(0,t) = v_{star}(t) + 1,000 \cdot w(0,t)$$

en de oplossing met behulp van de kleinste kwadraten methode is:

$$v_{star}(t) = 1,629 \cdot v(0,45,t) + 0,163 \cdot v(0,3,t) - 0,343 \cdot v(0,15,t) - 0,449 \cdot v(0,t)$$

$$w(0,t) = -1,73 \cdot v(0,45,t) + 0,109 \cdot v(0,3,t) + 0,744 \cdot v(0,15,t) + 0,877 \cdot v(0,t)$$

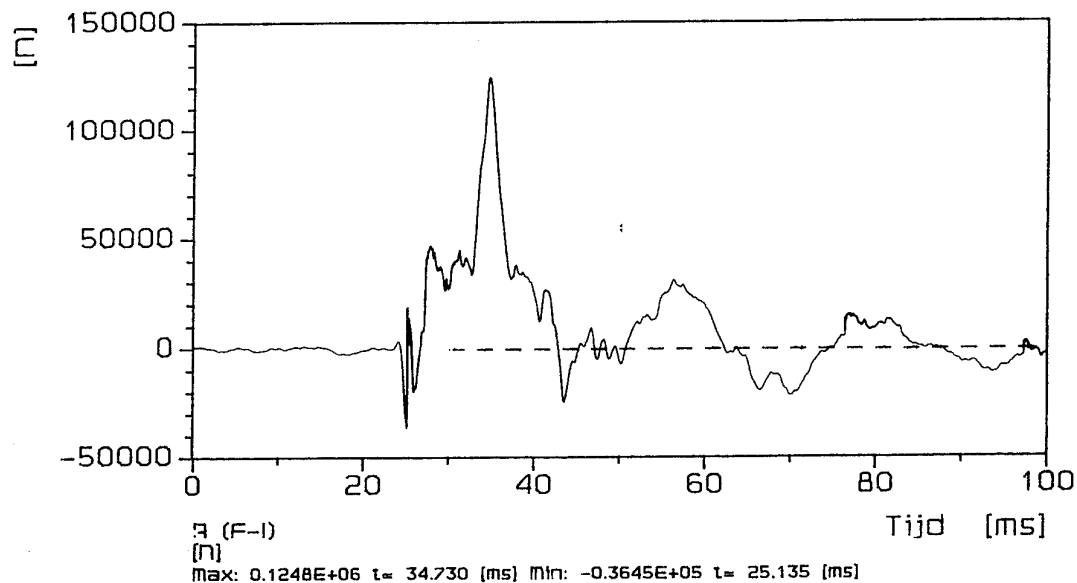
Figuur 12 laat de aldus verkregen $w(0,t)$ zien.



Figuur 12: Deflectie in het midden van plaat 4 - test 3.

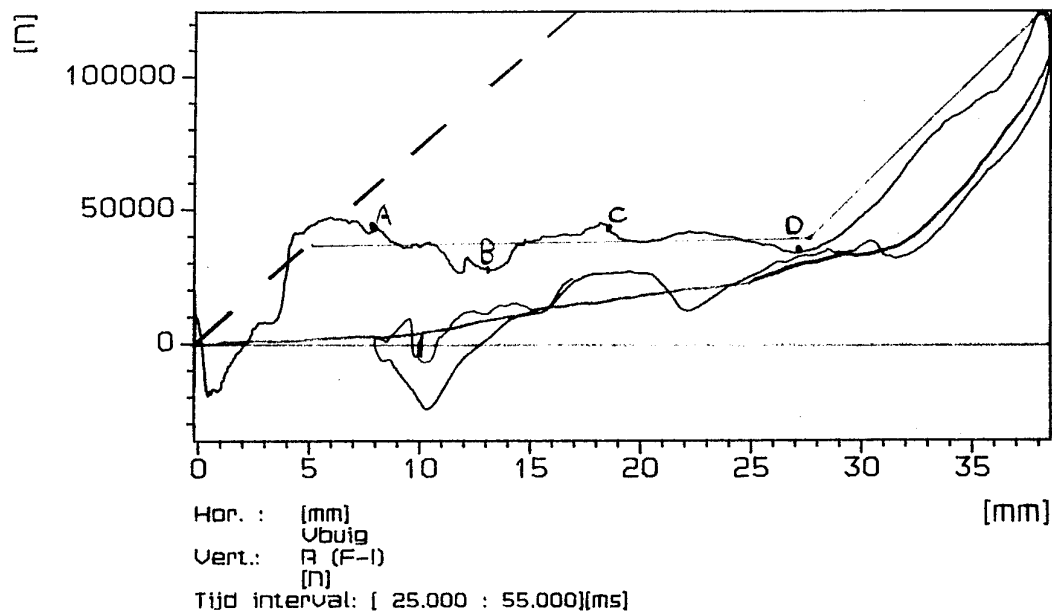
Voor het opsplitsen van de versnelling geldt hetzelfde stelsel vergelijkingen. De load-mass factor is voor de huidige doorbuigvorm gelijk aan $KLM = 0,856$. De weerstand $R(t)$, die in figuur 13 is weergegeven, is als volgt bepaald:

$$R(t) = 0,8p(t) - M \cdot a_{star}(t) - K_{LM} \cdot M \cdot a_b(0,t)$$



Figuur 13: Weerstand van plaat 4- test 3 in de tijd.

Het relateren van de weerstand aan de doorbuiging levert de weerstand-
vervormingscurve in figuur 14 op.



Figuur 14: Weerstand-vervormingscurve van plaat 4 - test 3.

Met deze weerstand-vervormingscurve is meer aan de hand dan met die voor test 1. Afwijkingen ten opzichte van een lineaire curve zijn niet alleen te wijten aan de aanwezigheid van hoge eigenfrequenties in de respons van de plaat. In deze plaat treedt tevens delaminatie op, waardoor het gedrag van de plaat wordt veranderd.

Net als in test 1 wordt verwacht dat initieel de weerstand ten gevolge van hoogfrequente trillingen afwisselend te laag en te hoog is ten opzichte van de globale weerstand. Met behulp van de globale stijfheid die gevonden was in test 1 ($k = 7,1 \cdot 10^6$, stippellijn) kunnen we zien dat dit inderdaad het geval is. De curve ligt eerst onder de stippellijn, kruist deze dan en komt erboven te liggen. Vervolgens kruist de curve de stippellijn weer om er onder te duiken. Hierna komt de curve echter niet meer terug bij de stippellijn om er omheen te kronkelen. De curve wijkt steeds verder af van de lineaire elastische functie. De weerstand van de plaat neemt niet meer toe terwijl de vervorming wel toeneemt. Dit duidt op een vorm van plastisch gedrag.

Wat is dat dan voor plastisch gedrag? Er ontstaat geen plastisch scharnier in het paneel. Na afloop van de proef vertoonde de plaat geen blijvende vervorming. Wel is bekend dat er delaminatie op heeft getreden. Is dat de reden voor een zogenaamd plastische fase in de weerstand-vervormingscurve?

Anderzijds kunnen we uit de doorbuigvorm (figuur 11) zien dat in de fase van vrijwel constante weerstand ($28 < t < 33$ ms) hoogfrequente trillingen nog steeds een rol spelen. Daardoor zou mogelijk de weerstand lager kunnen zijn. En dat is dan de reden dat na deze fase de weerstand weer snel toeneemt.

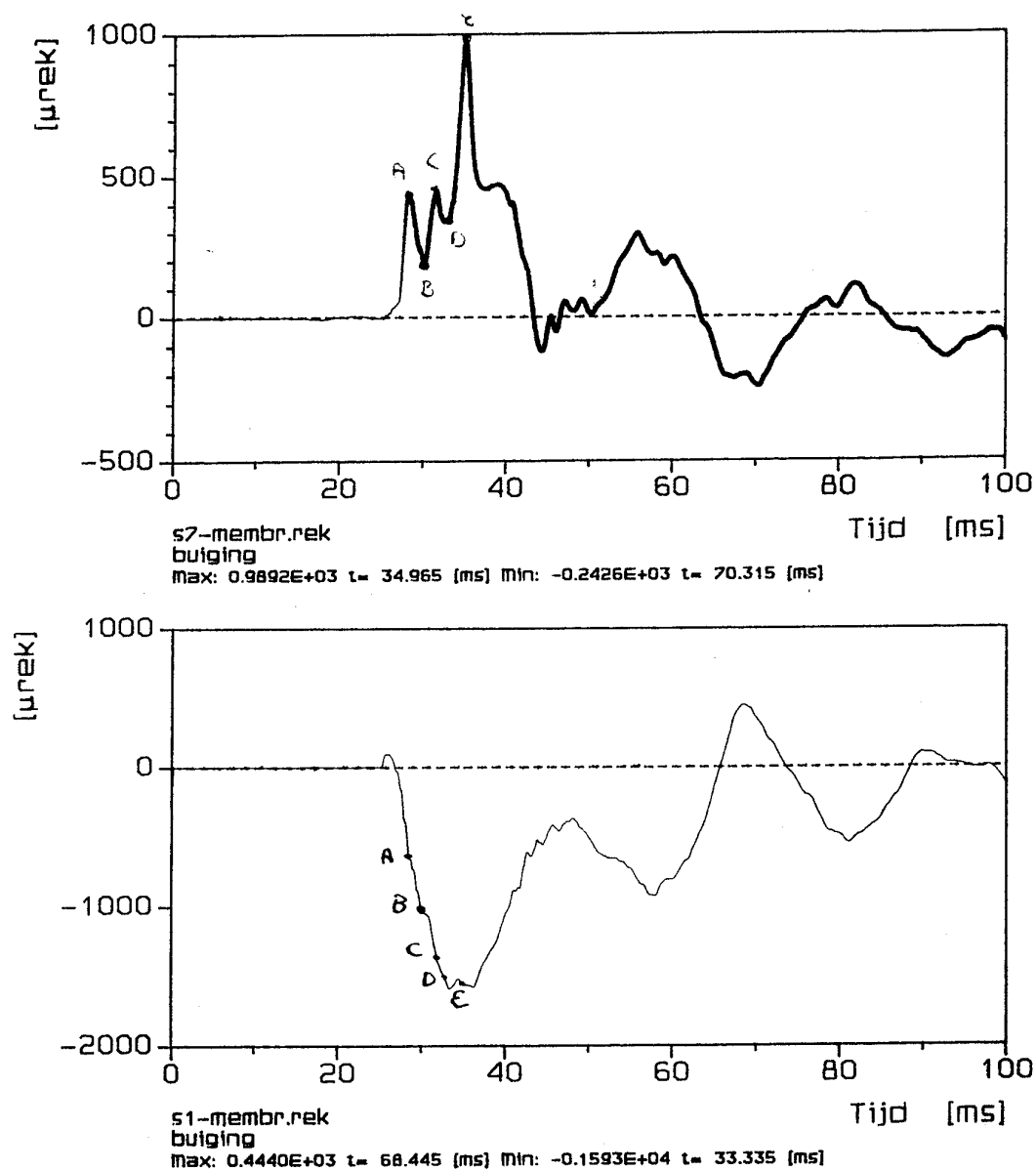
Laten we om te beginnen eerst eens duidelijk stellen wat de weerstand is die we uit de signalen bepalen. Uit de mechanica is bekend dat de weerstand R voor iedere doorbuigingsvorm en op ieder tijdstip voldoet aan:

$$R = 8 \cdot (M_m - M_s + F_{mem} w(0)) / L_s \quad (7)$$

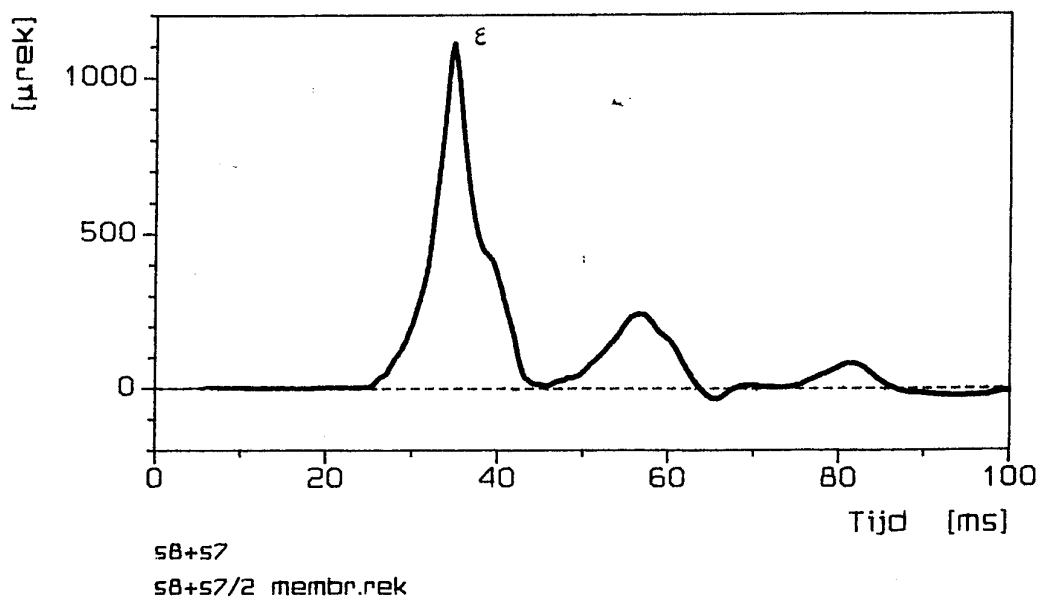
waarin M_s het moment bij de inklemming is, M_m het moment in het midden, F_{mem} de membraankracht in het midden en $w(0)$ de deflectie in het midden. Vergelijking 7 houdt in dat als R constant is, $M_m - M_s + F_{mem} w(0)$ constant moet zijn. L_s is uiteraard een constante. Deze momenten en deze membraankracht kunnen we nader bekijken aan de hand van de rekmetingen. Het buigend moment in een doorsnede en de membraankracht zijn direkt gekoppeld aan respectievelijk de buigrek, ϵ_{buig} en de membraanrek ϵ_{mem} in de betreffende doorsnede. Deze rekken kunnen we uit de gemeten rekken als volgt afleiden:

$$\begin{aligned} \epsilon_{mem} &= (\epsilon_{onbelast} + \epsilon_{belast}) / 2 \\ \epsilon_{buig} &= (\epsilon_{onbelast} - \epsilon_{belast}) / 2 \end{aligned} \quad (8)$$

De aldus bepaalde buigrekken in het midden en op 50 mm van de inklemming zijn weergegeven in figuur 15. De membraanrek in het midden van de plaat is weergegeven in figuur 16.



Figuur 15: Buigrekken a. in het midden van de plaat en b. dicht bij de oplegging.



Figuur 16: Membraanrek in het midden van de plaat.

Wordt de buigrek in het midden vergeleken met de weerstand dan zien we dat deze ongeveer synchroon verlopen. Pieken (aangegeven door A, B, C, D en E) treden op hetzelfde tijdstip op. In de fase van een nagenoeg constante weerstand ($28 \text{ ms} < t < 33 \text{ ms}$) is de buigrek in het midden ook ongeveer constant, en dus ook het buigend moment M_m .

In test 1 hadden we op basis van de stijfheid al waargenomen dat de momenten in de inklemming vanwege een afwijkende doorsnede niet zo groot zijn. De weerstand wordt daarom ook met name bepaald door het moment in het midden, wat in deze test met het synchrone verloop tussen weerstand en buigrek in het midden nog eens is aangetoond. Toch klopt het niet helemaal. Terwijl in fase A-D de buiging in het midden schommelt om een vaste waarde, nemen de buiging in de inklemming en de membraanrek continue toe, zoals figuur 15b en 16 laten zien. Voor de weerstand zou daarom verwacht worden dat deze zou schommelen om een stijgende waarde in plaats van om een constante waarde.

Voor fase A-B lijkt alles nog normaal. De weerstand neemt minder sterk af dan de buiging in het midden, omdat de toename van buiging in de oplegging en de toename in membraanrek de afname in weerstand reduceren.

In fase B-C echter neemt de weerstand relatief minder toe dan de buiging in het midden, terwijl op basis van de eveneens toenemende buiging bij de oplegging en de toenemende membraanrek nu verwacht zou worden dat de weerstand relatief sterker toe zou nemen.

De enige verklaring die gevonden is voor het feit dat dit niet zo is, is delaminatie. In deze fase wordt de aanvang van delaminatie in de oplegging vermoed. Door delaminatie neemt het traagheidsmoment I in een doorsnede af, waardoor het buigend moment relatief ook lager is. Het meest waarschijnlijke tijdstip is $t \approx 31 \text{ ms}$, waar een knik zichtbaar is in de weerstands-tijd functie (figuur 13).

Uit de reksignalen in bijlage B blijkt dat inderdaad ter plaatse van de inklemming de grootste rekken optreden. Het is dus logisch dat hier als eerste delaminatie optreedt. Op tijdstip $t = 31$ ms kunnen we uit het s_2 -signaal een lokale rek ($\epsilon_{mem} + \epsilon_{buig}$) van circa 1300 μ rek aflezen voor de belaste zijde dicht bij de inklemming. In de inklemming zelf zal de rek nog aanzienlijk hoger zijn. Nog steeds verstoren hoog frequente trillingen het gedrag. In fase C-D neemt de buiging in het midden weer af, terwijl de buiging in de inklemming en de membraanrek nog steeds toenemen. Uit het feit dat de afname in buiging geringer is dan in fase A-B blijkt dat de invloed van de hoogfrequente trillingen afneemt. En inderdaad in fase D-E krijgt de plaat inderdaad de globale doorbuigvorm. Door een snelle toename in buiging maakt het midden een inhaalslag ten opzichte van de inklemming, waar de buiging niet meer toeneemt. De belasting maakt een verdere doorbuiging echter niet meer mogelijk. De horizontale tak in de weerstand-vervormingscurve is dus het gevolg van twee fenomenen in het gedrag van de plaat, namelijk hoogfrequente trillingen en delaminatie. De teruggaande tak van de weerstand-vervormingscurve ligt onder de opgaande, wat duidelijk aangeeft dat energie is geabsorbeerd tijdens het vervormingsproces.

Het kan geconcludeerd worden dat de test-methode om de weerstand-vervormingscurve te bepalen ook voor de huidige platen toe te passen is. De resultaten zijn echter moeilijker te interpreteren. Hoogfrequente trillingen zijn in de huidige geteste panelen veel dominanter dan in de betonplaten. Daardoor wijkt de gevonden curve nogal af van de verwachte globale curve. Dankzij rekmetingen konden we echter toch beschrijven wat er gebeurde in de plaat. Delaminatie is een ander aspect dat interpretatie van de resultaten bemoeilijkt.

3.4 Resultaten ballistische proeven

Paneel nummer 5 is voor het bepalen van de ballistische limietsnelheid negen maal beschoten met een 1.1 gram FSP. De gemeten snelheden lagen tussen de 499 m/s en de 587 m/s. In tabel 3 wordt voor ieder schot de initiële en de eindsnelheid gegeven. Uit zes van de negen schoten, waarvan er drie werden gestopt en drie het paneel penetreerden, is de V50-limiet bepaald. In de laatste kolom tabel 3 worden deze schoten met een sterretje aangegeven. De limietsnelheid bedroeg 535 m/s met een standaard deviatie van 14 m/s.

Tabel 3: Overzicht ballistische proeven.

Schotnr.	V_i [m/s]	V_r [m/s]	V50
8450	499	0	
8556	520	0	*
8449	523	0	*
8455	526	perf.	*
8453	538	0	*
8454	547	106	*
8448	553	perf.	*
8452	563	106	
8451	587	164	

Uit het verkregen resultaat kan geconcludeerd worden dat het paneel geen hoge ballistische weerstand heeft. Ter vergelijking: de eis welke is gesteld als limietsnelheid voor een militaire helm is 610 m/s. De ballistische weerstand van het paneel kan ongeveer vergeleken worden met de ballistische weerstand van een aluminium plaat met een dikte van 4 tot 6 mm.

4 Conclusie en aanbevelingen

Een haalbaarheidsstudie is uitgevoerd naar mogelijke toepassingen van een bestaand lichtgewicht hitte en drukbestendig kunststof paneel voor bescherming tegen ballistische en/of schokgolf effecten, waar het paneel in wezen niet voor ontworpen is.

De doelstelling van het onderzoek was het experimenteel testen van één type lichtgewicht paneel waarbij de weerstand tegen schokgolf en ballistische effecten bepaald diende te worden.

Uit het onderzoek kon het volgende worden geconcludeerd.

- Het paneel delamineert bij belastingen hoger dan 70 kPa. Delaminatie begint bij de inklemming.
- Het paneel heeft een geringe stijfheid. In het midden zijn uitwijkingen van meer dan 80 mm gemeten. Het zou daarom nodig zijn om een aanzienlijke ruimte achter de constructie vrij te laten.
- Door de concentratie van de inklemming op vijf posities is het inklemmoment lager dan bij een verdeelde inklemming en is daardoor de globale buigstijfheid van het ingeklemde paneel niet veel groter dan van een opgelegd paneel.
- De toegepaste inklemming is niet optimaal. Door de bout-bevestiging worden krachten lokaal geconcentreerd en als gevolg daarvan werd het paneel over de kop heen getrokken.
- Na delaminatie kan het stof uit de kern vrij komen. Dit stof is zeer fijn en kan veel gezondheidsproblemen veroorzaken wanneer de panelen worden toegepast om mensen of materieel te beschermen.
- De ballistische weerstand is niet hoog. Een V50-waarde van een 1,1 gram FSP van 535 m/s is gevonden. Dit is lager dan wat geeist wordt van een helm. Het paneel kan alleen ingezet worden als bescherming tegen kleine en lichte granaatscherven.

Eventuele verbeteringen kunnen worden aangebracht door.

- Het stijver maken van de buitenlagen door vezelmateriaal of matrixmateriaal met een grotere elasticiteitsmodulus te gebruiken of door dikkere lagen toe te passen. Met behulp van dergelijke stijvere buitenlagen zal de uitbuiging door de constructie geringer zijn en kan de loze ruimte achter de constructie kleiner zijn. Tevens zal er doordat de rekken bij een bepaalde belasting geringer zijn, minder snel delaminatie optreden.
- Het verwijderen van de kern of het toepassen van een andere kern van niet-poedervormig materiaal. Enkel verwijdering van de kern zou de stijfheid van de constructie aanzienlijk verlagen. Wel is het probleem van het stof opgelost. Beter is het om een meer geschikt kernmateriaal toe te passen. De Zortech-kern in de huidige panelen is speciaal voor een goed en langdurig thermische isolerend vermogen. Binnen de krijgsmacht bestaat niet direct behoefte aan deze goede eigenschap, hoewel het het comfort voor het personeel kan vergroten, met name in warme of koude regionen. Bescherming is echter veel belangrijker. De

Zortech-kern kan daarom beter vervangen worden door een andere laag die de ballistische weerstand of de stijfheid van de constructie vergroot. Gedacht kan worden aan keramiek voor ballistische weerstand (= duur) of meerdere lagen vezel-kunststof.

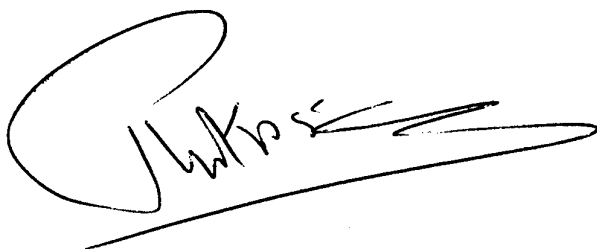
- Ander massief materiaal om de kern op te sluiten. Daardoor wordt het paneel zowel stijver als sterker.
- De manier waarop de panelen bevestigd werden kan verbeterd worden. Hier-voor kan gedacht worden aan vierzijdige inklemming, meerdere bouten, het vergroten van het oppervlak waar de panelen ingeklemd worden door bijvoorbeeld een strip onder de bouten of een profiel over het paneel.

In het algemeen kan geconcludeerd worden dat het paneel in de huidige vorm niet geschikt is om het toe te passen als bescherming tegen ernstige schokgolf (met invallende piekdruk hoger dan 30 à 40 kPa en faseduur meer dan 30 à 35 ms) of ballistische dreiging. Door het onderzoek zijn de zwakke punten van het paneel aangetoond. Mogelijke verbeteringen zijn stijvere materialen en een betere kern.

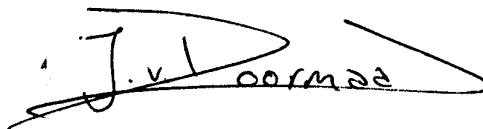
5 Referenties

- [1] Doormaal, J.C.A.M.,
Dynamic deformation capacity of concrete. Phase 2 Test method,
PML 1995-A24, Prins Maurits Laboratorium, Rijswijk, 1995.
- [2] Leussink, J.W.,
Respons van een dynamisch belaste ligger. Analyse op basis van eigen-
trillingsvormen,
PML 1983-19, Prins Maurits Laboratorium, Rijswijk, 1983.

6 Ondertekening

A large, stylized handwritten signature in black ink, appearing to read 'R.M. van de Kastele'.

R.M. van de Kastele
Projectleider/Auteur

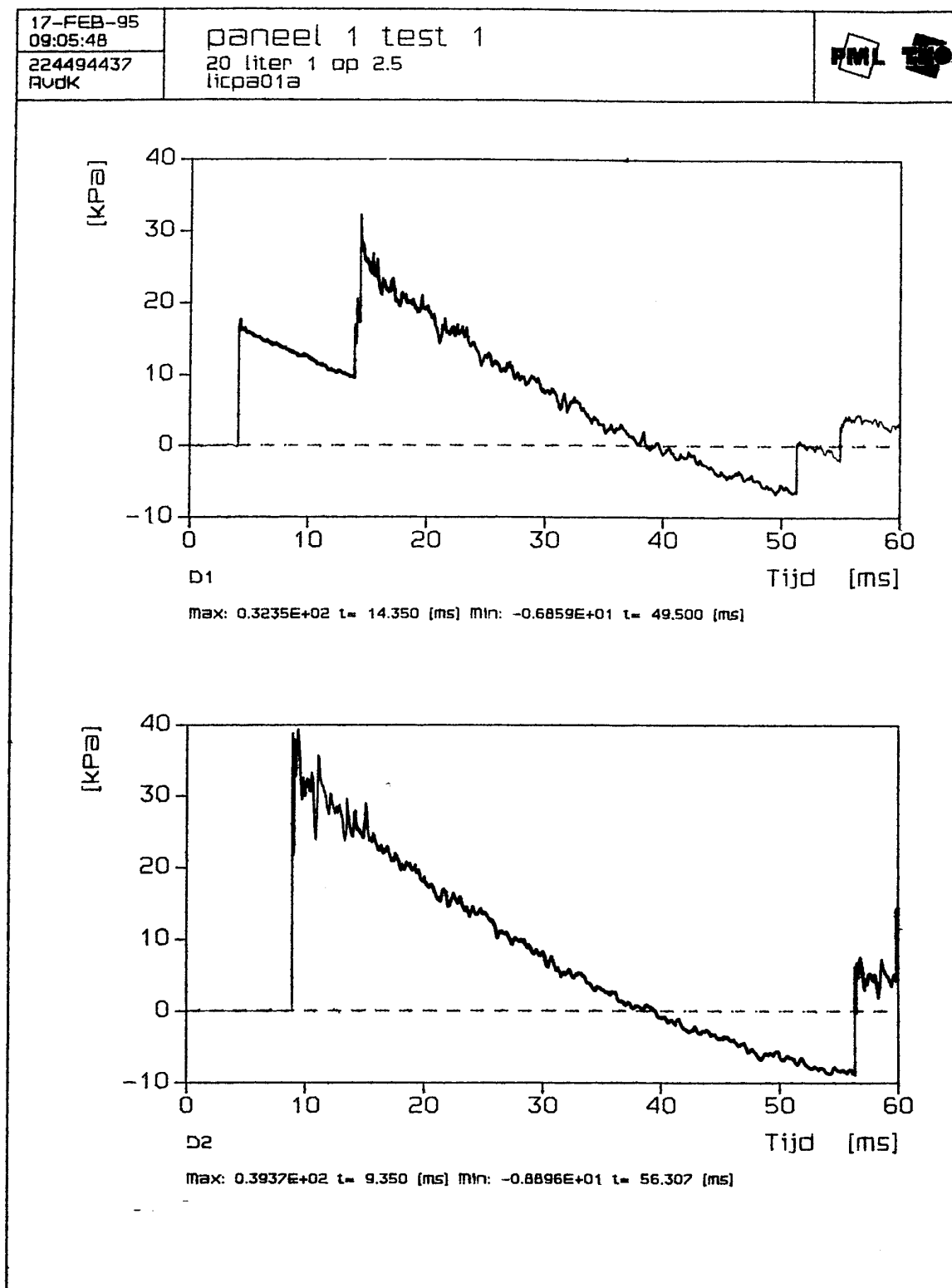
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J.C.A.M. van Doormaal'.

Ir. J.C.A.M. van Doormaal
Auteur

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rolf van Wees'.

Ir. R.M.M. van Wees
Research Coördinator

Bijlage A Grafische weergave van de druk signalen

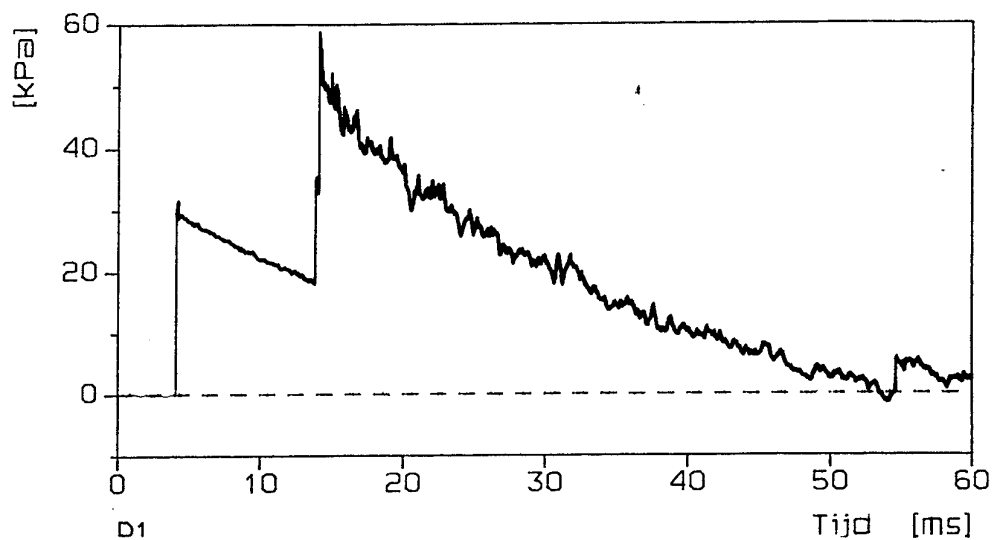


17-FEB-95
09:15:18

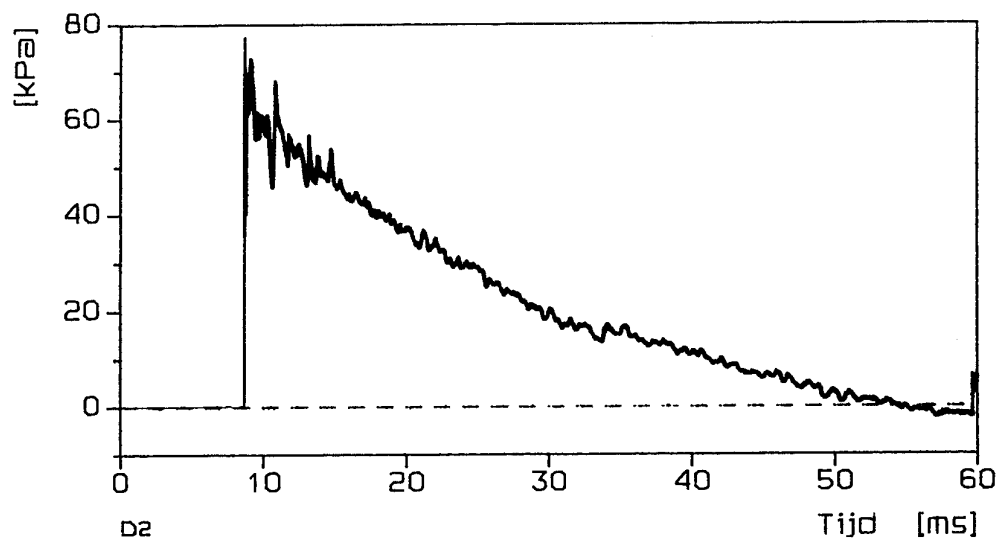
224494437
RvdK

paneel 1 test 2

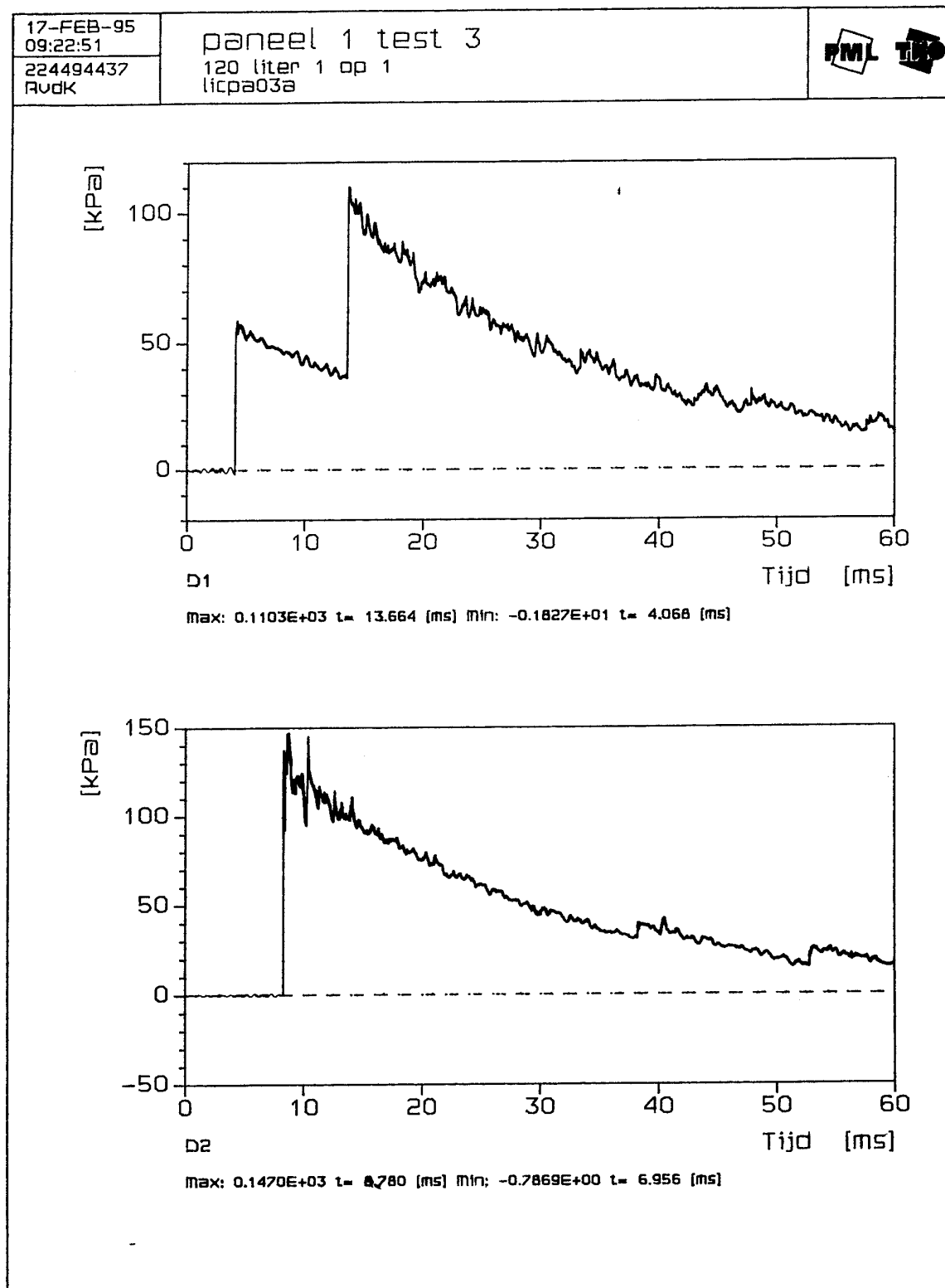
70 liter 1 op 2.5
licpa02a



Max: 0.5882E+02 t= 14.073 [ms] Min: -0.1606E+01 t= 54.073 [ms]

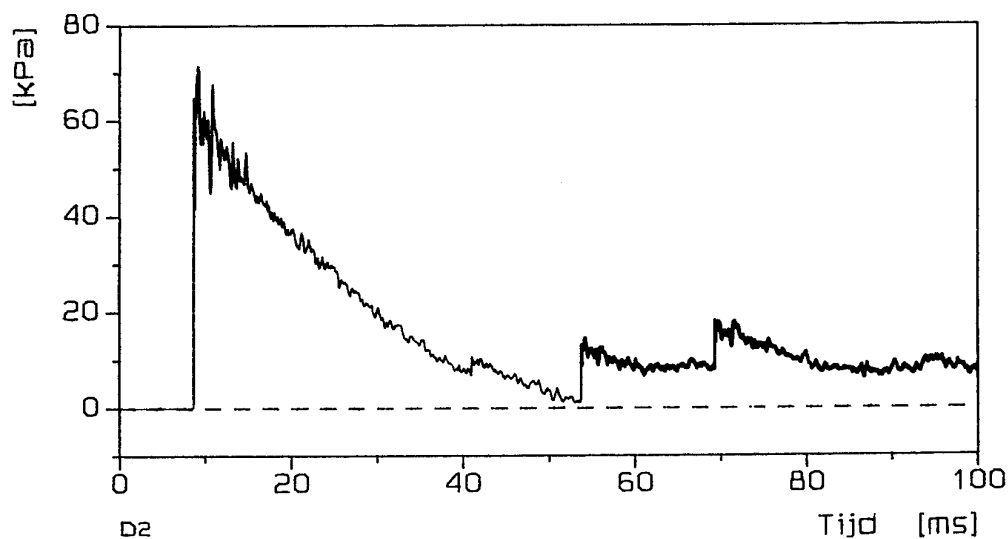
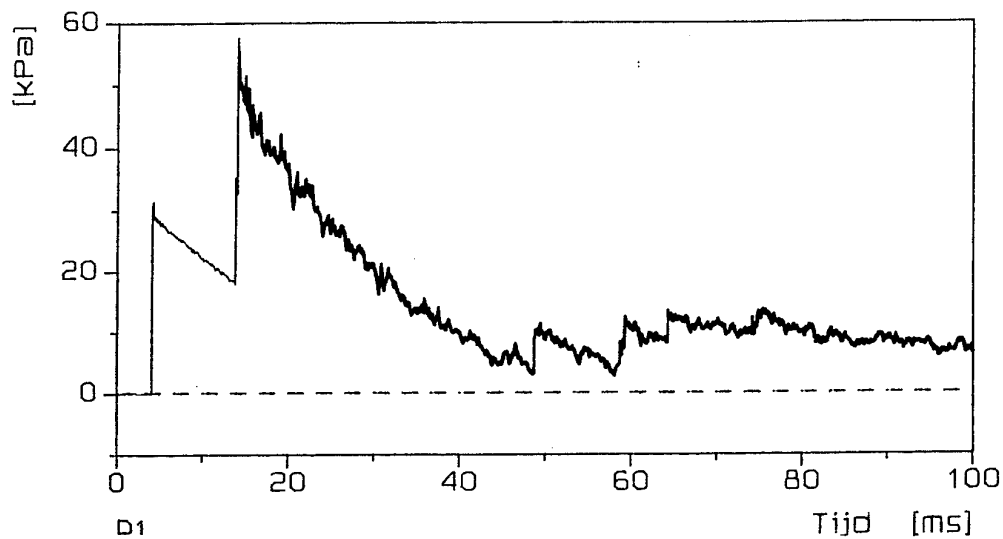


Max: 0.7732E+02 t= 8.699 [ms] Min: -0.2440E+01 t= 57.111 [ms]



20-FEB-95
10:53:28
224494437
RvdK

paneel 2 test 1
70 liter 1 op 2.5
licpa04a



PML 1995-A61

Bijlage A

20-FEB-95

10:55:18

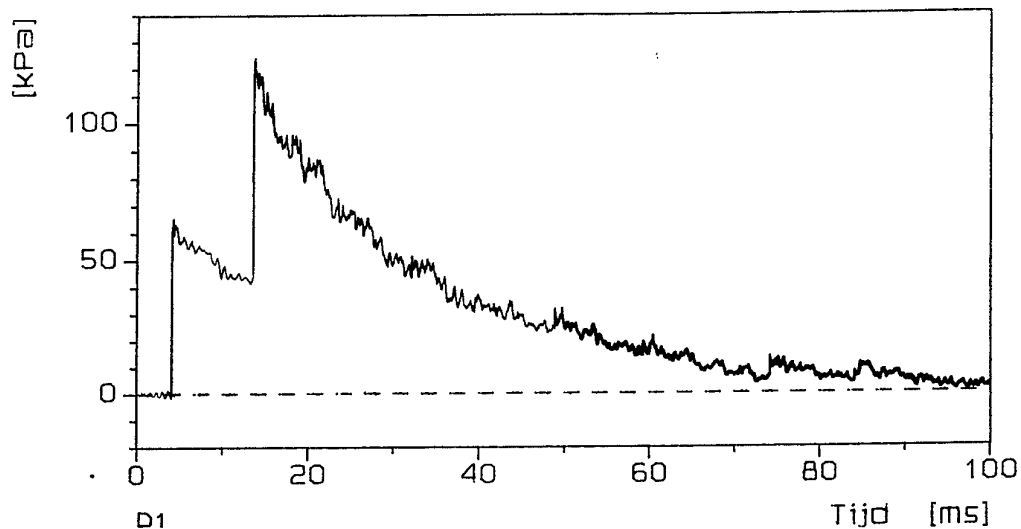
224494437

RVDK

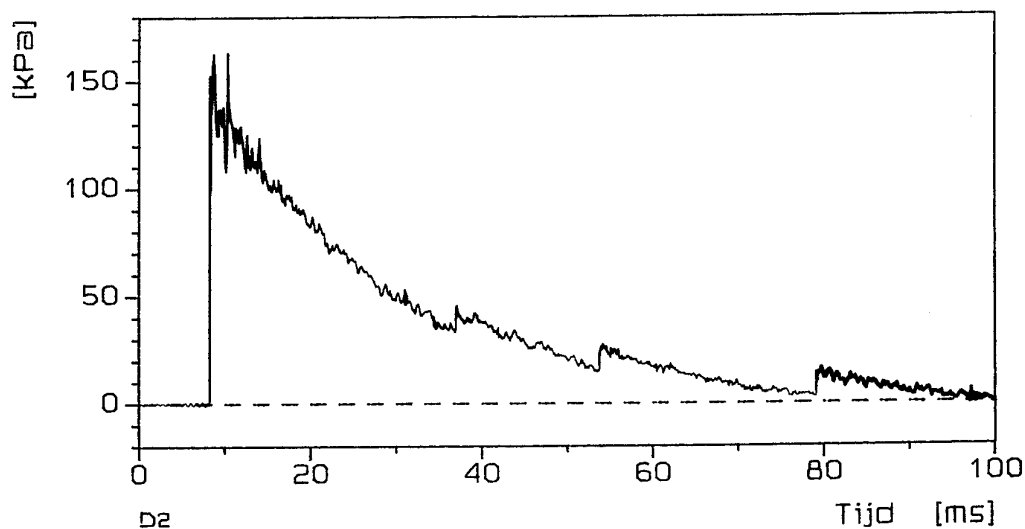
paneel 2 test 2

120 liter 1 op 1

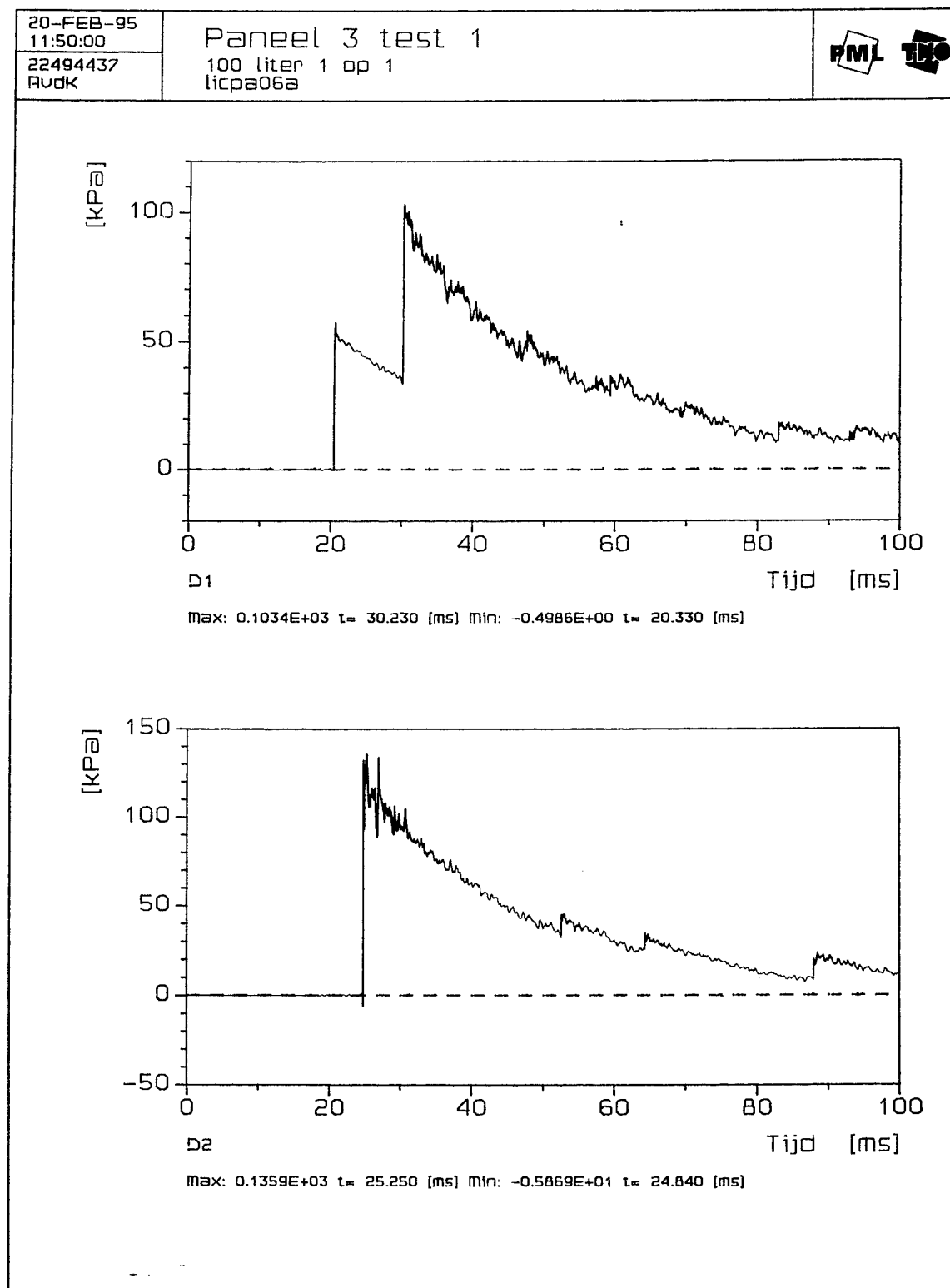
licpa05a



max: 0.1242E+03 t= 13.704 [ms] Min: -0.1800E+01 t= 4.064 [ms]



max: 0.1633E+03 t= 10.344 [ms] Min: -0.1065E+01 t= 7.764 [ms]



17-FEB-95

11:42:57

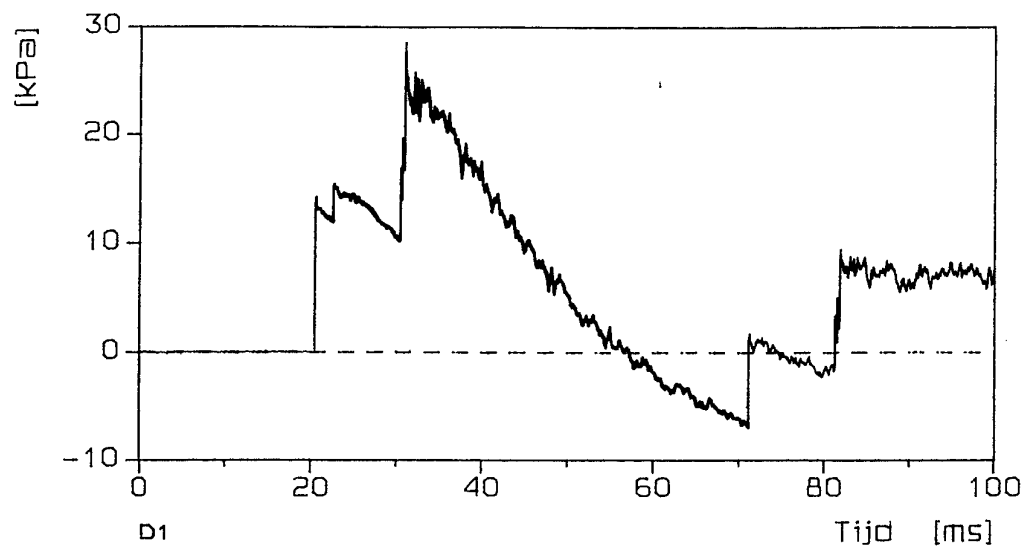
22494437

RvdK

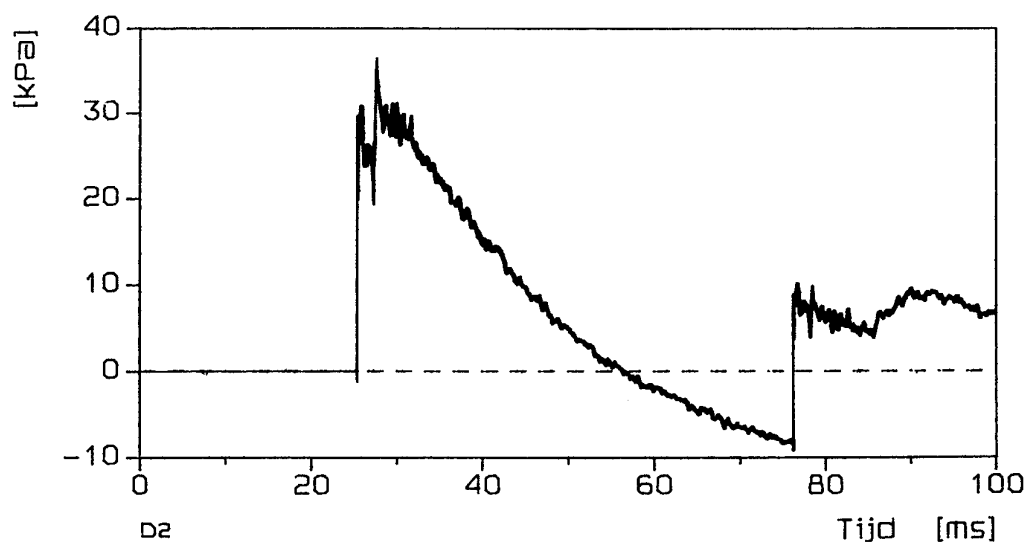
Paneel 4 test 1

20 liter 1 op 2.5

licpa07a



Max: 0.2860E+02 t= 30.935 [ms] Min: -0.7033E+01 t= 71.140 [ms]



Max: 0.3652E+02 t= 27.660 [ms] Min: -0.9240E+01 t= 76.245 [ms]

17-FEB-95

14:18:24

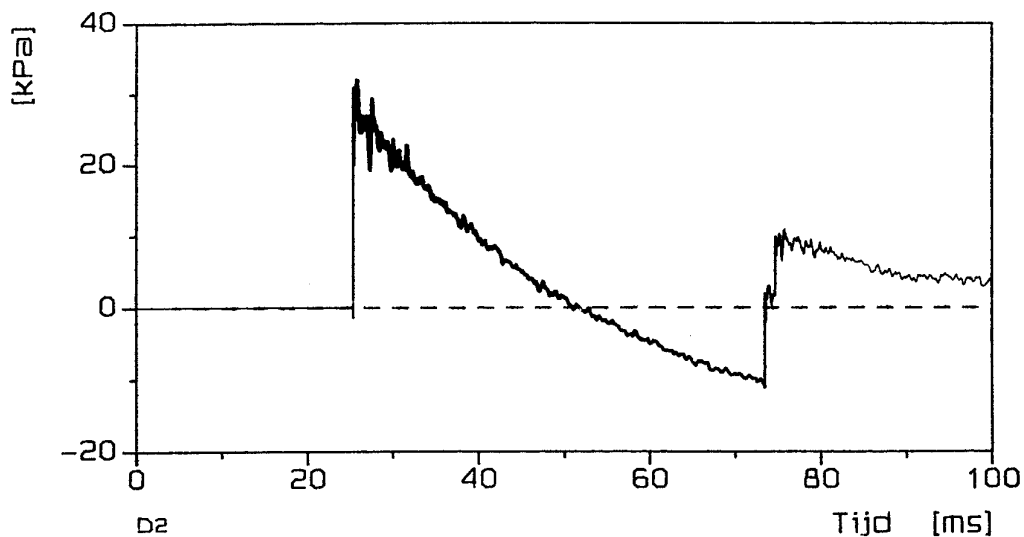
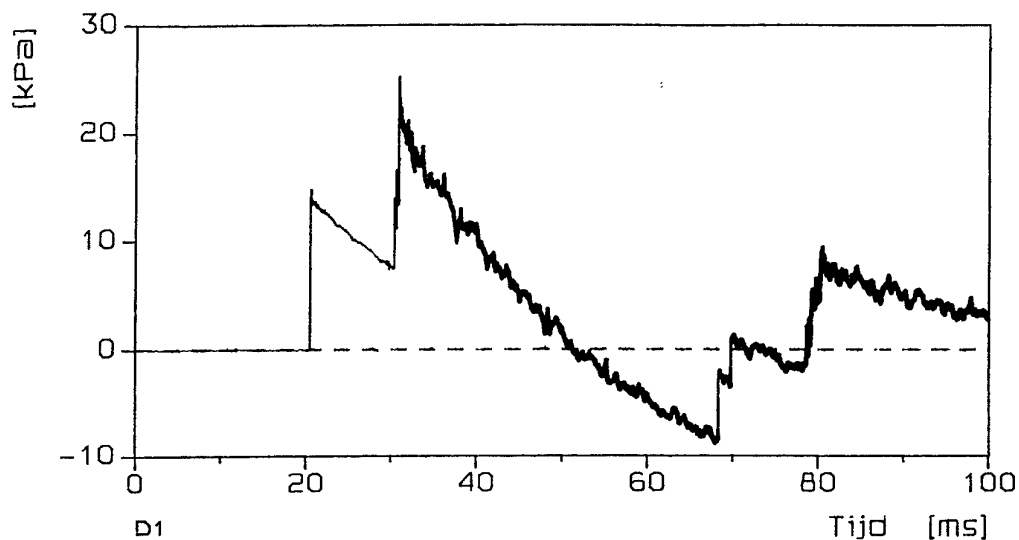
22494437

RvdK

Paneel 4 test 2

20 liter 1 op 2.5

licpa08a

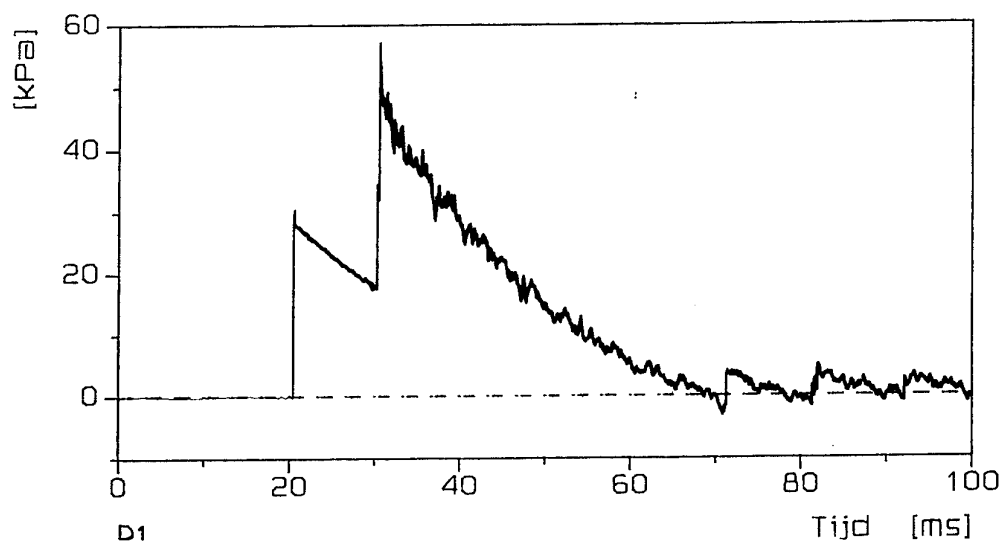


17-FEB-95
12:11:36

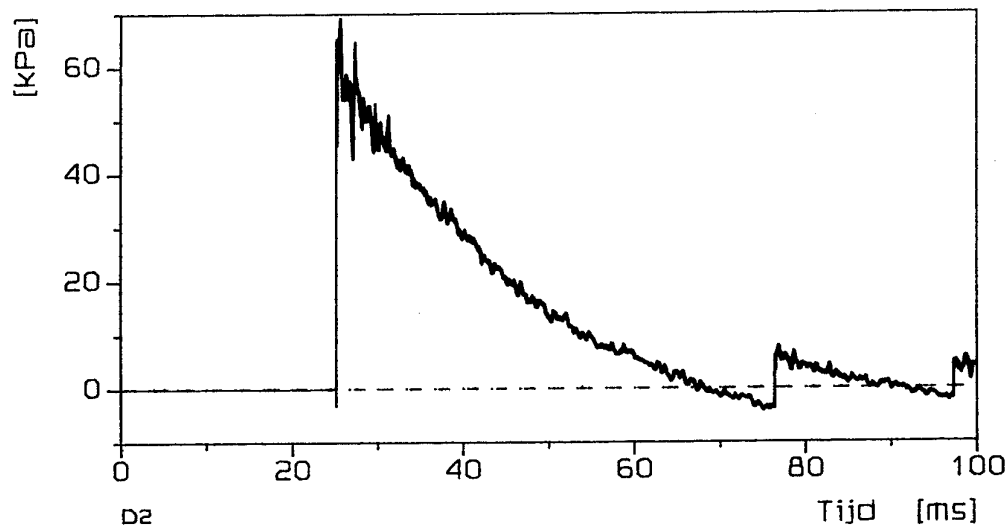
22494437
RvdK

Paneel 4 test 3

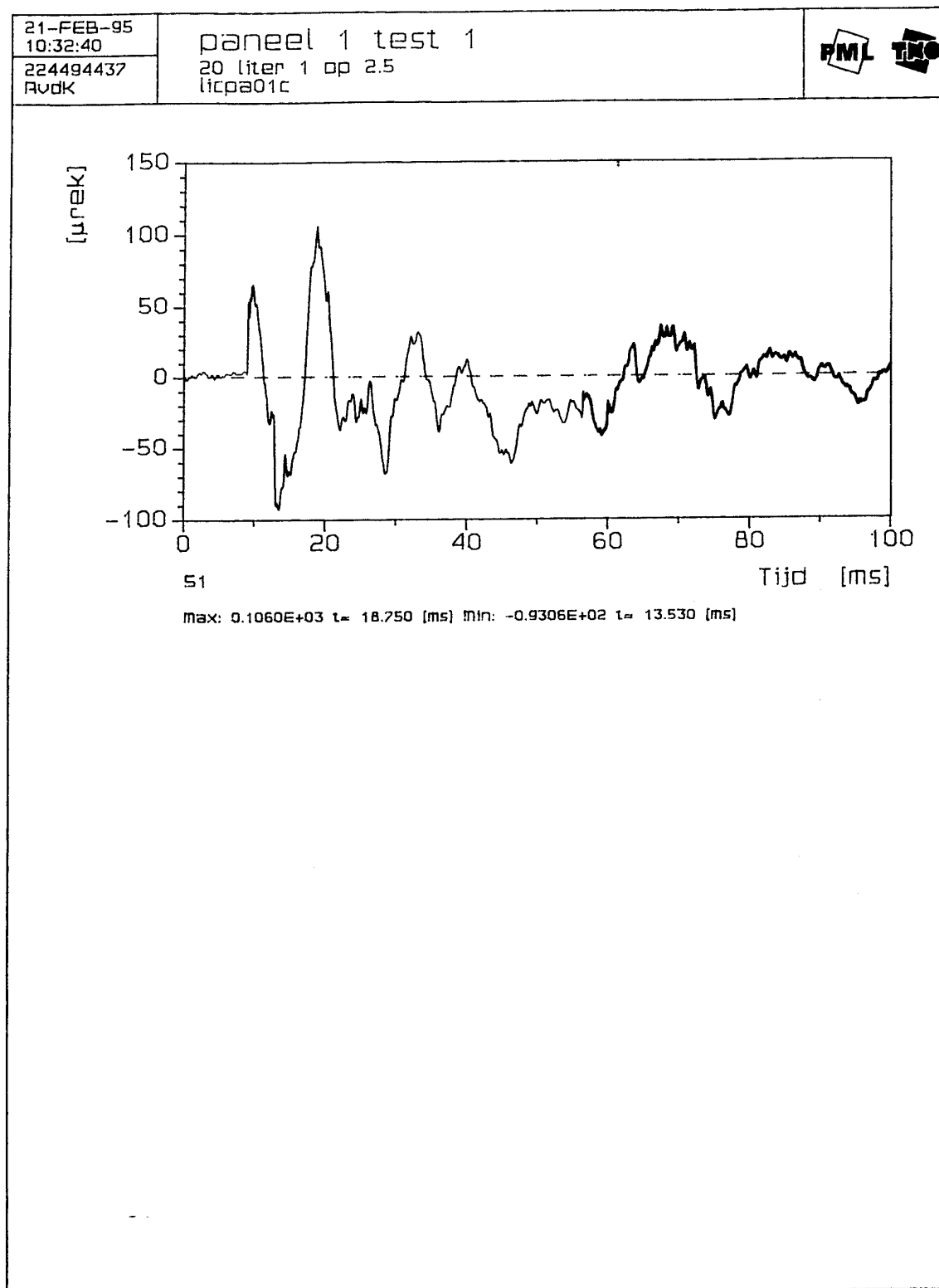
70 liter 1 op 2.5
licpa09a

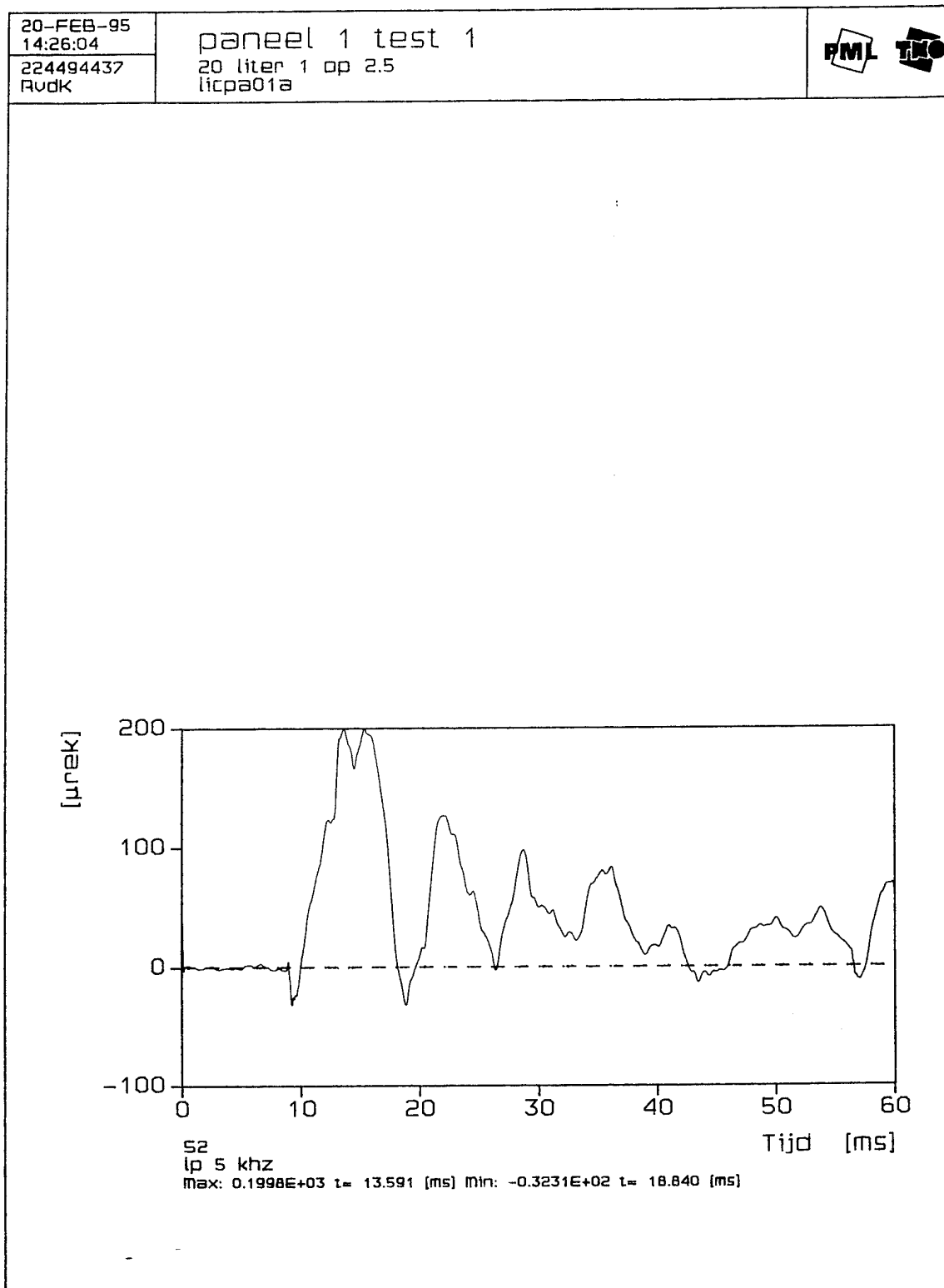


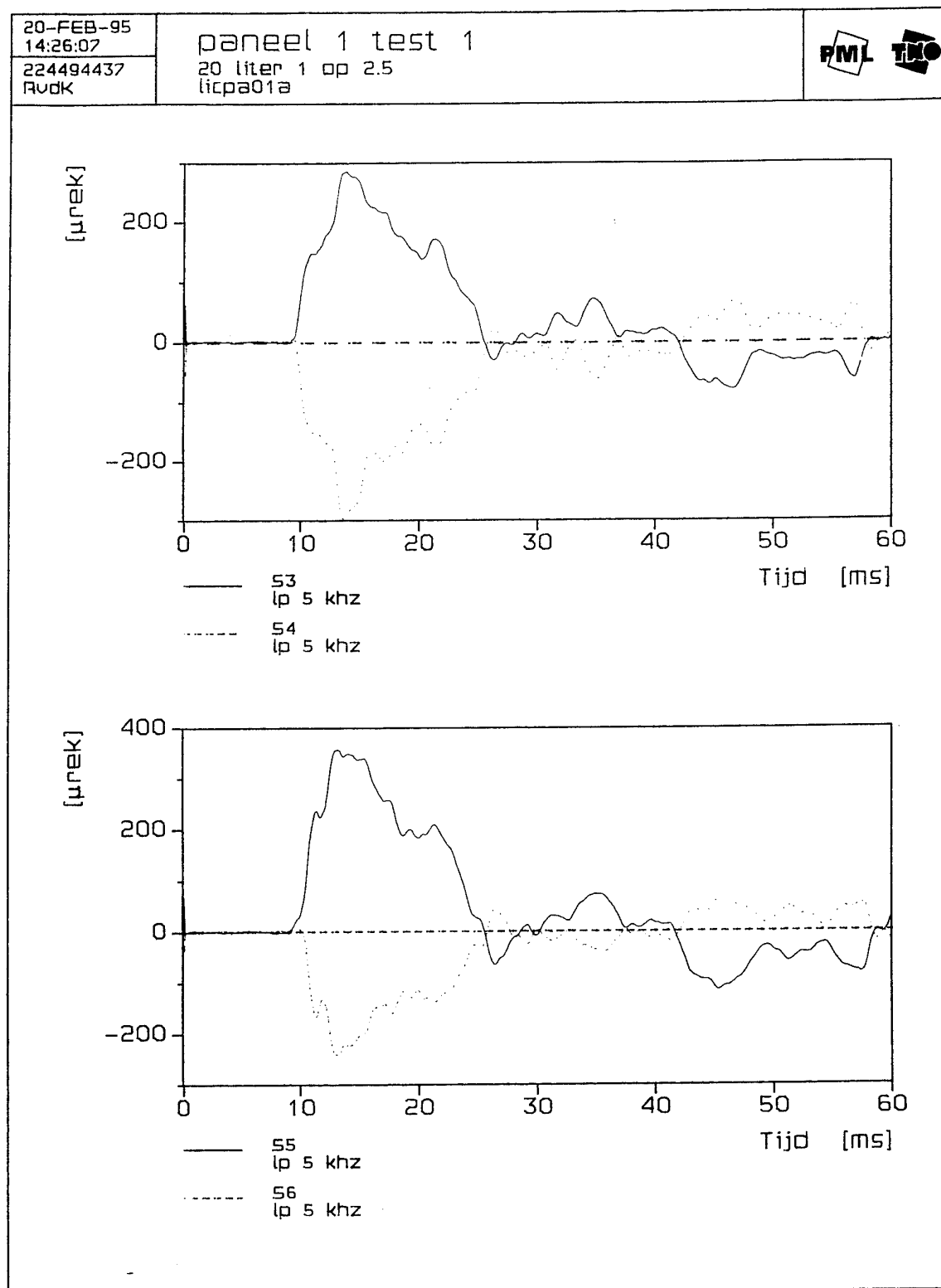
max: 0.5724E+02 t= 30.535 [ms] Min: -0.3270E+01 t= 70.885 [ms]

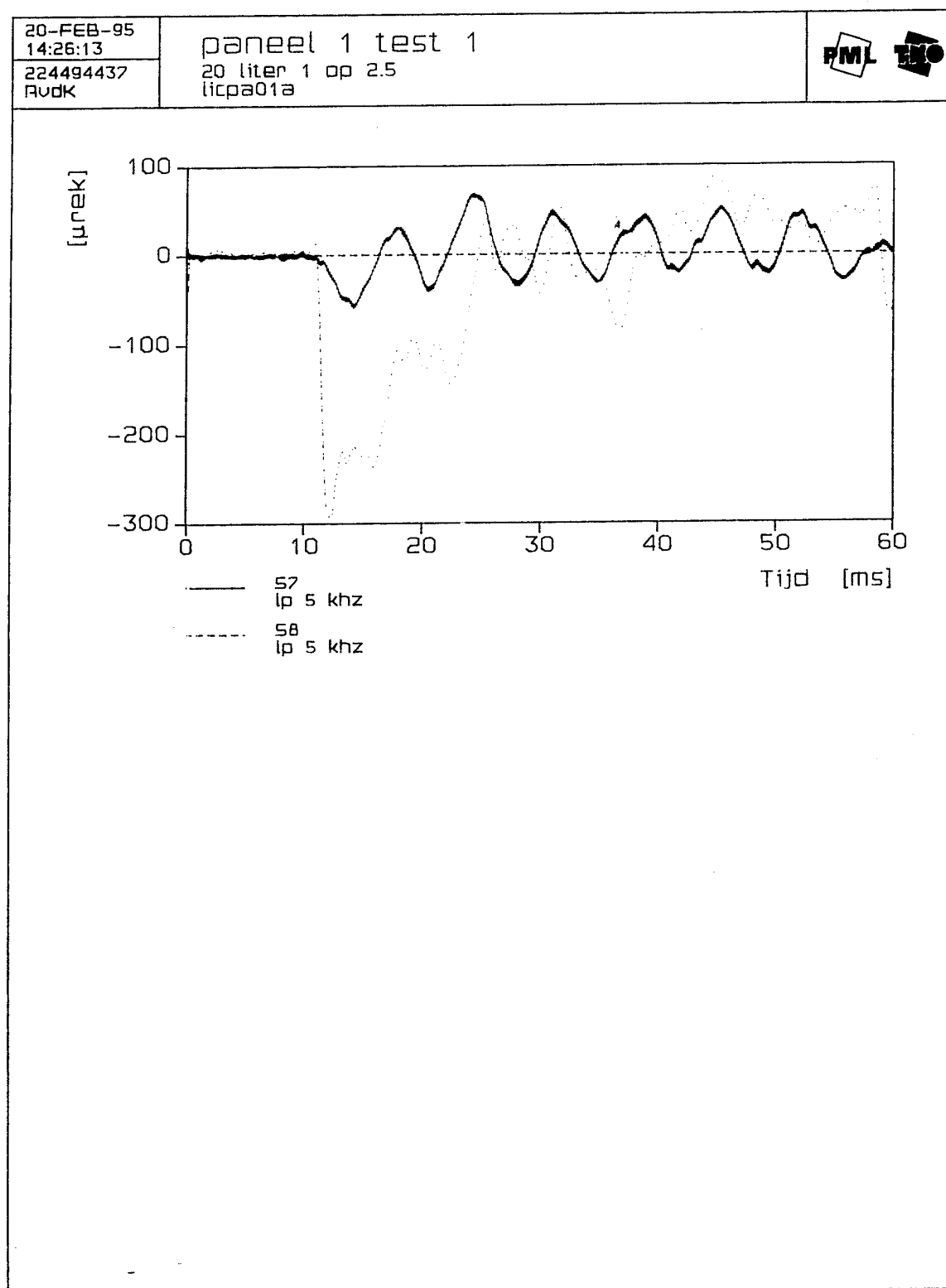


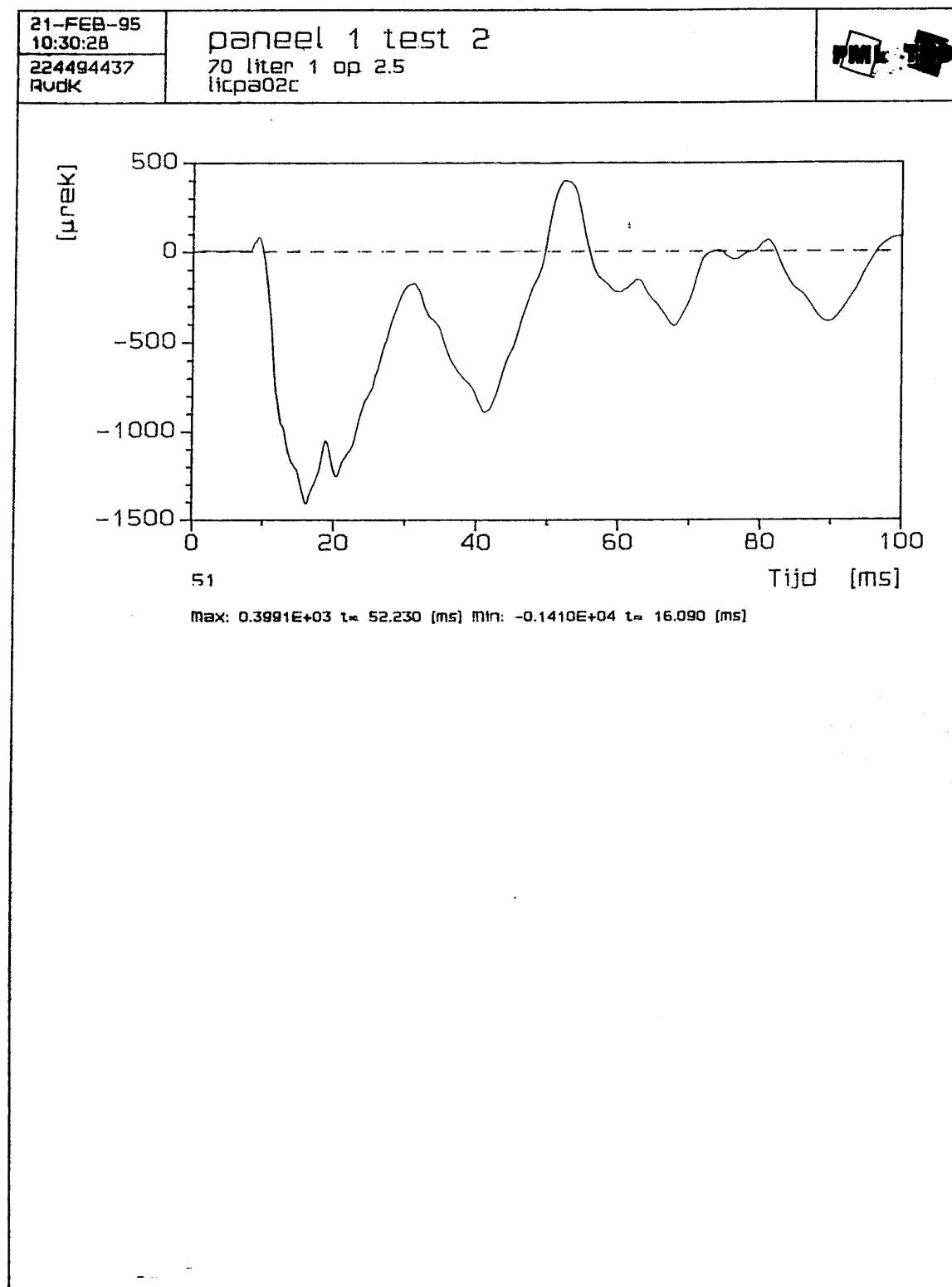
max: 0.6928E+02 t= 25.610 [ms] Min: -0.4197E+01 t= 75.180 [ms]

Bijlage B Grafische weergave van de rekstrook signalen







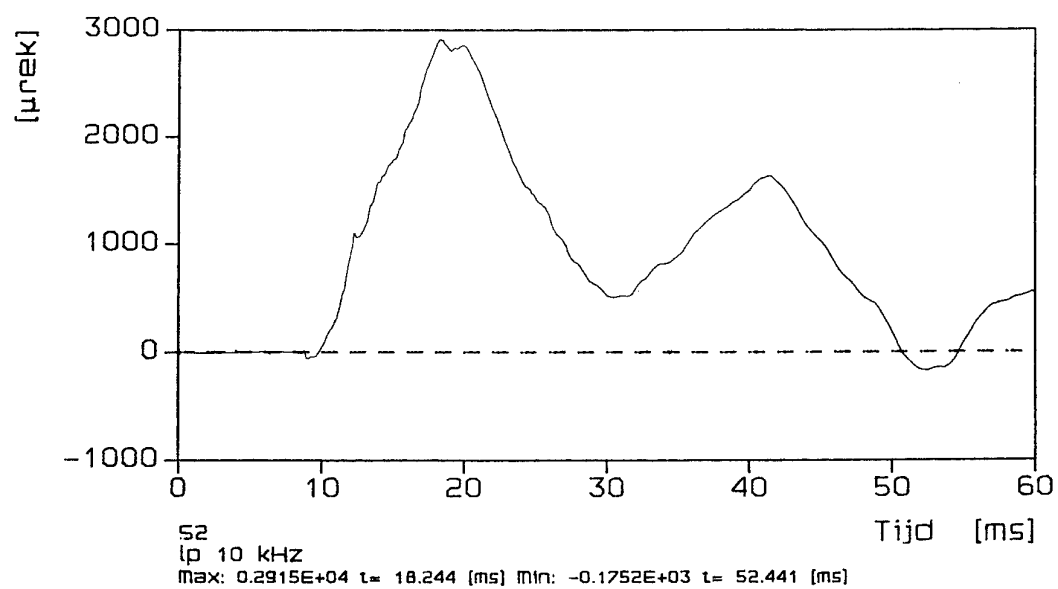


20-FEB-95
16:03:44

224494437
RvdK

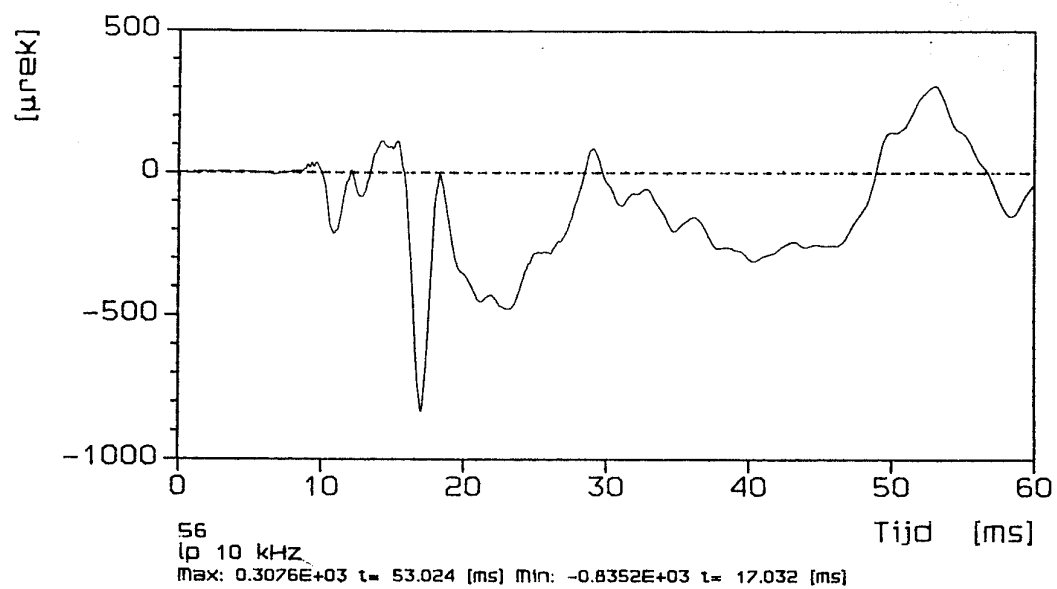
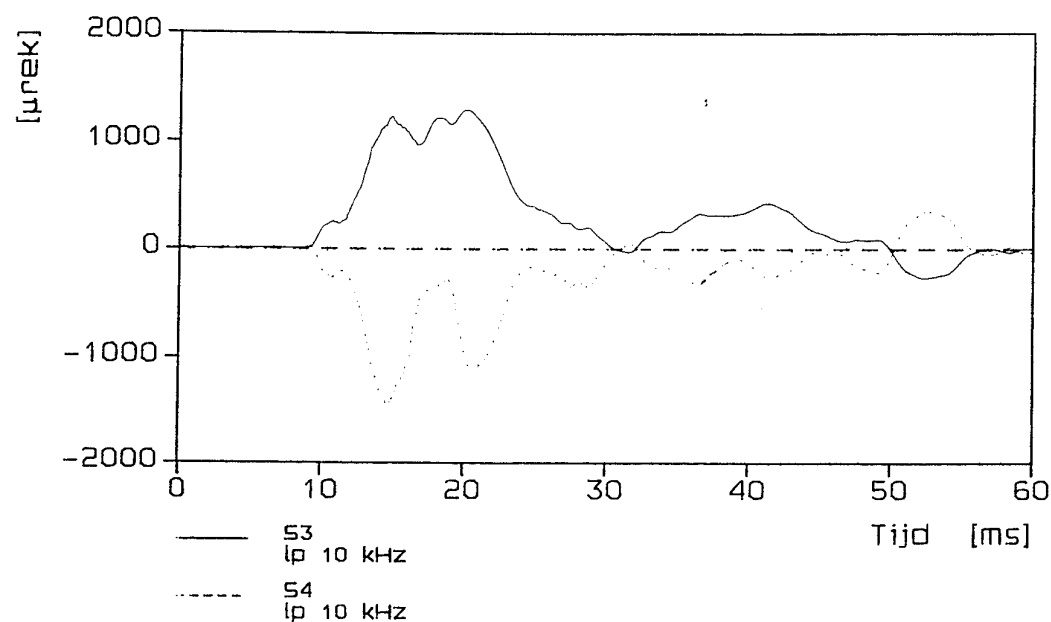
paneel 1 test 2

70 liter 1 op 2.5
licpa02a



20-FEB-95
16:03:47
224494437
RvdK

paneel 1 test 2
70 liter 1 op 2.5
licpa02a



20-FEB-95

16:03:52

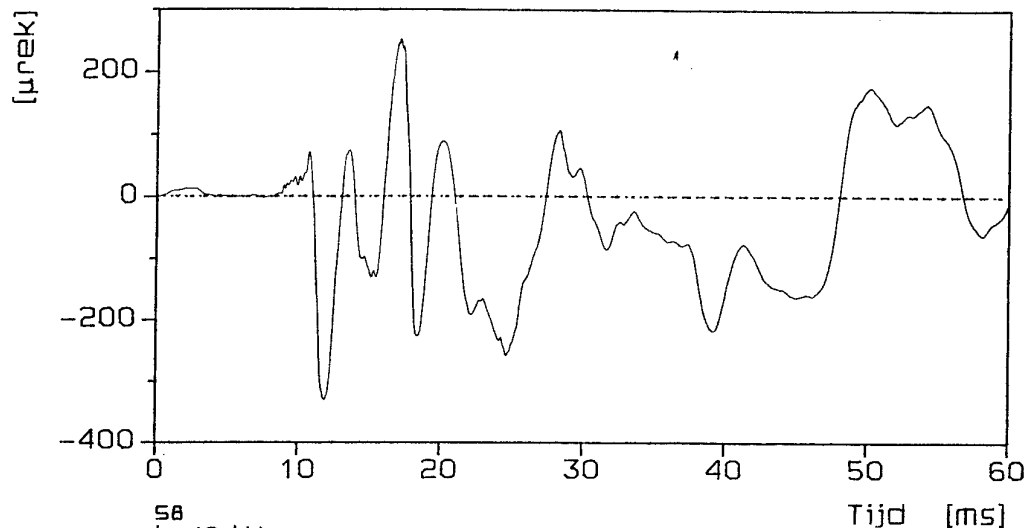
224494437

RvdK

paneel 1 test 2

70 liter 1 op 2.5

licpa02a

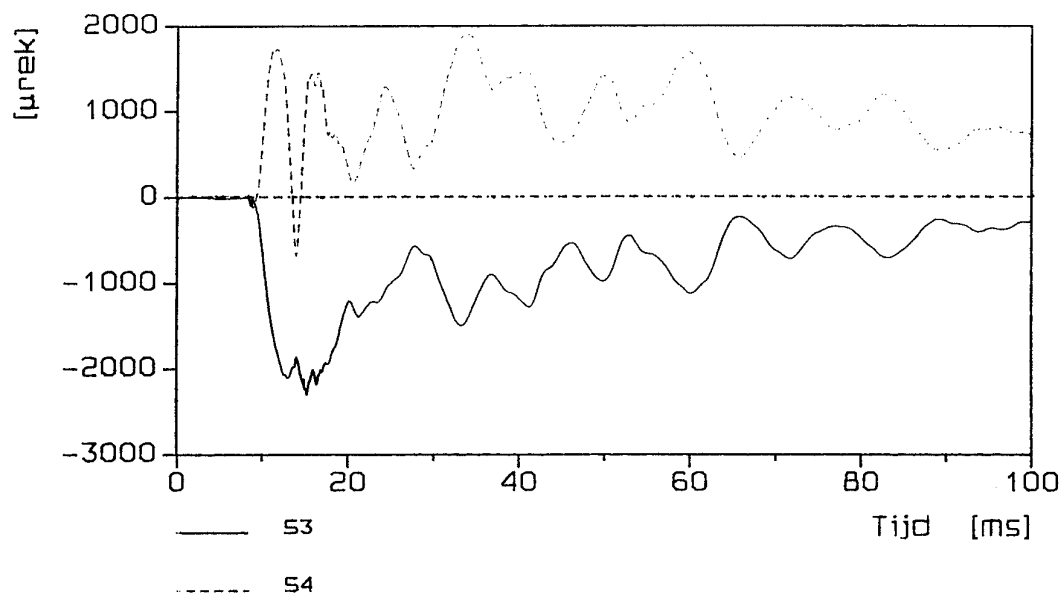
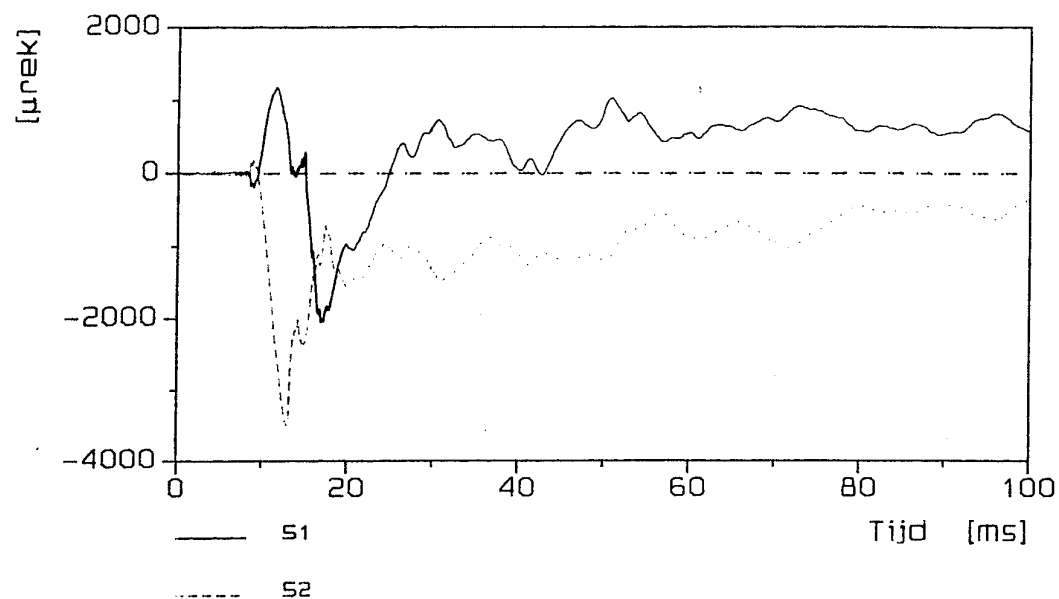


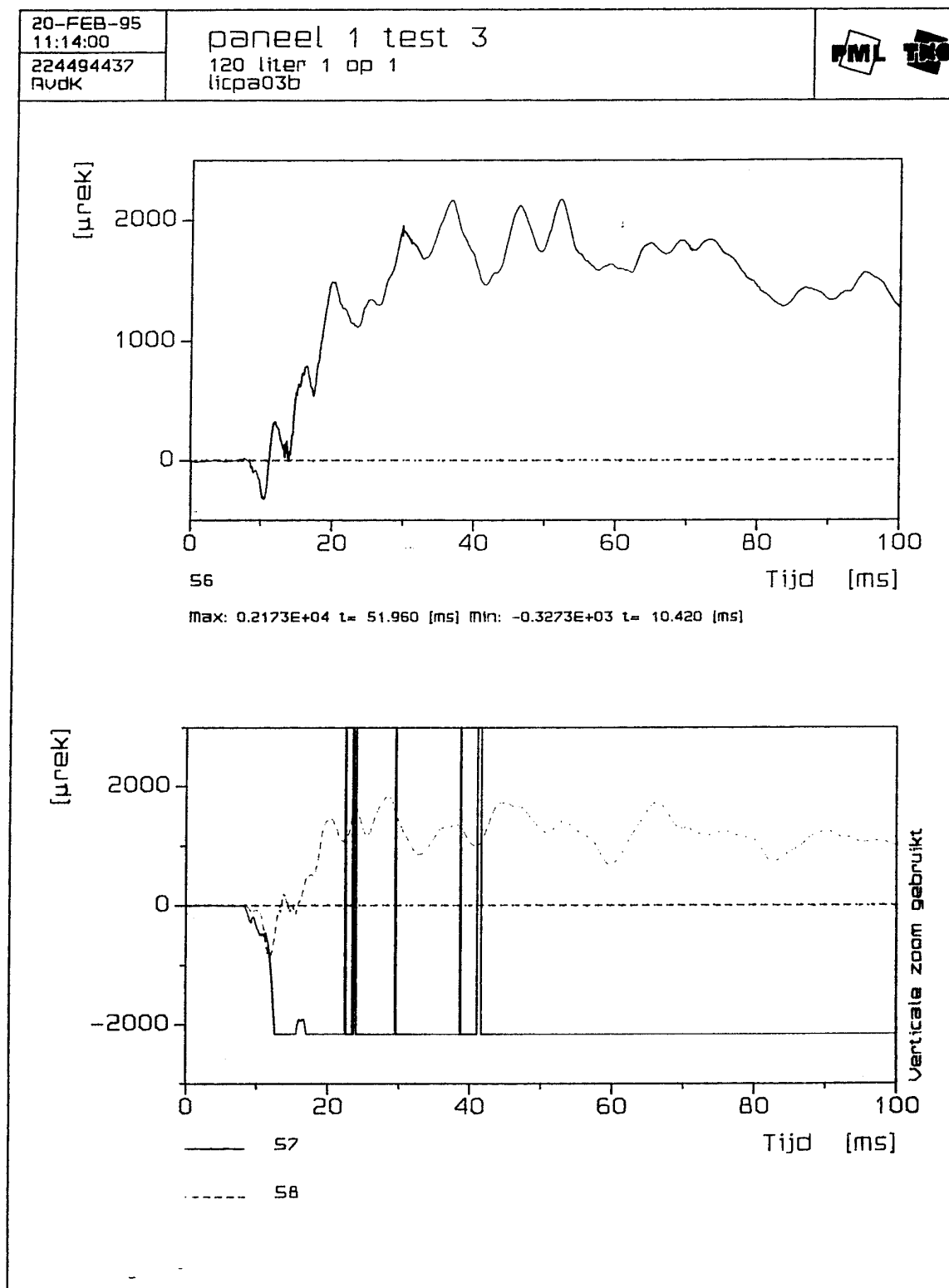
20-FEB-95
11:13:57

224494437
RvdK

paneel 1 test 3

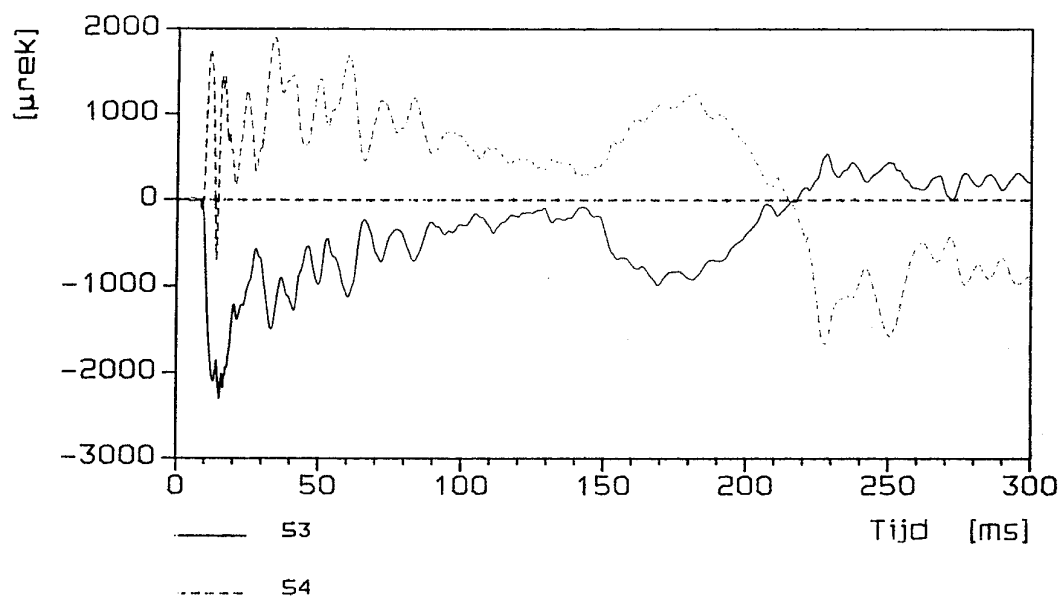
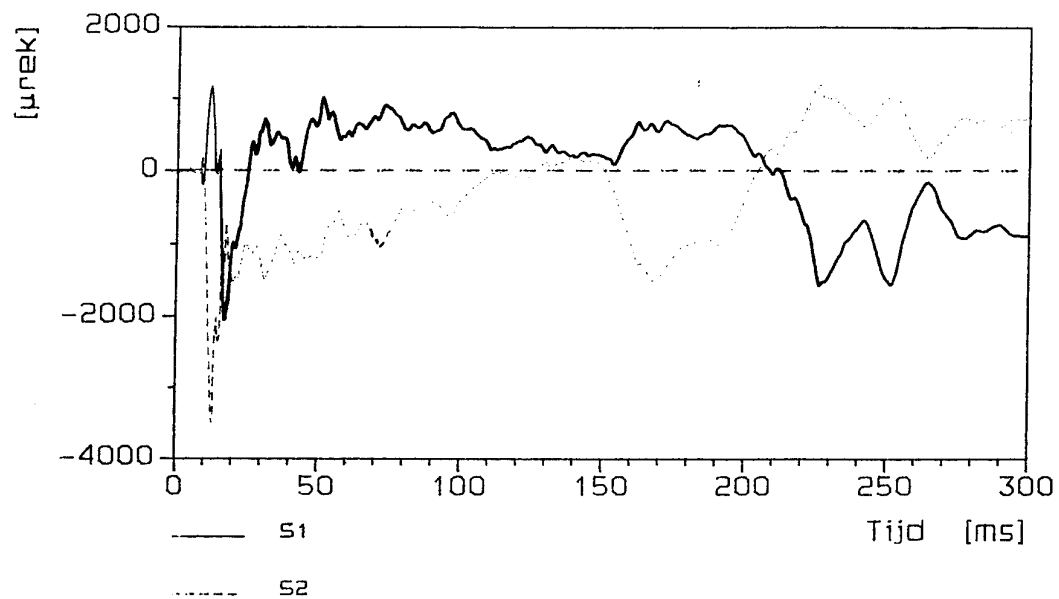
120 liter 1 op 1
licpa03b

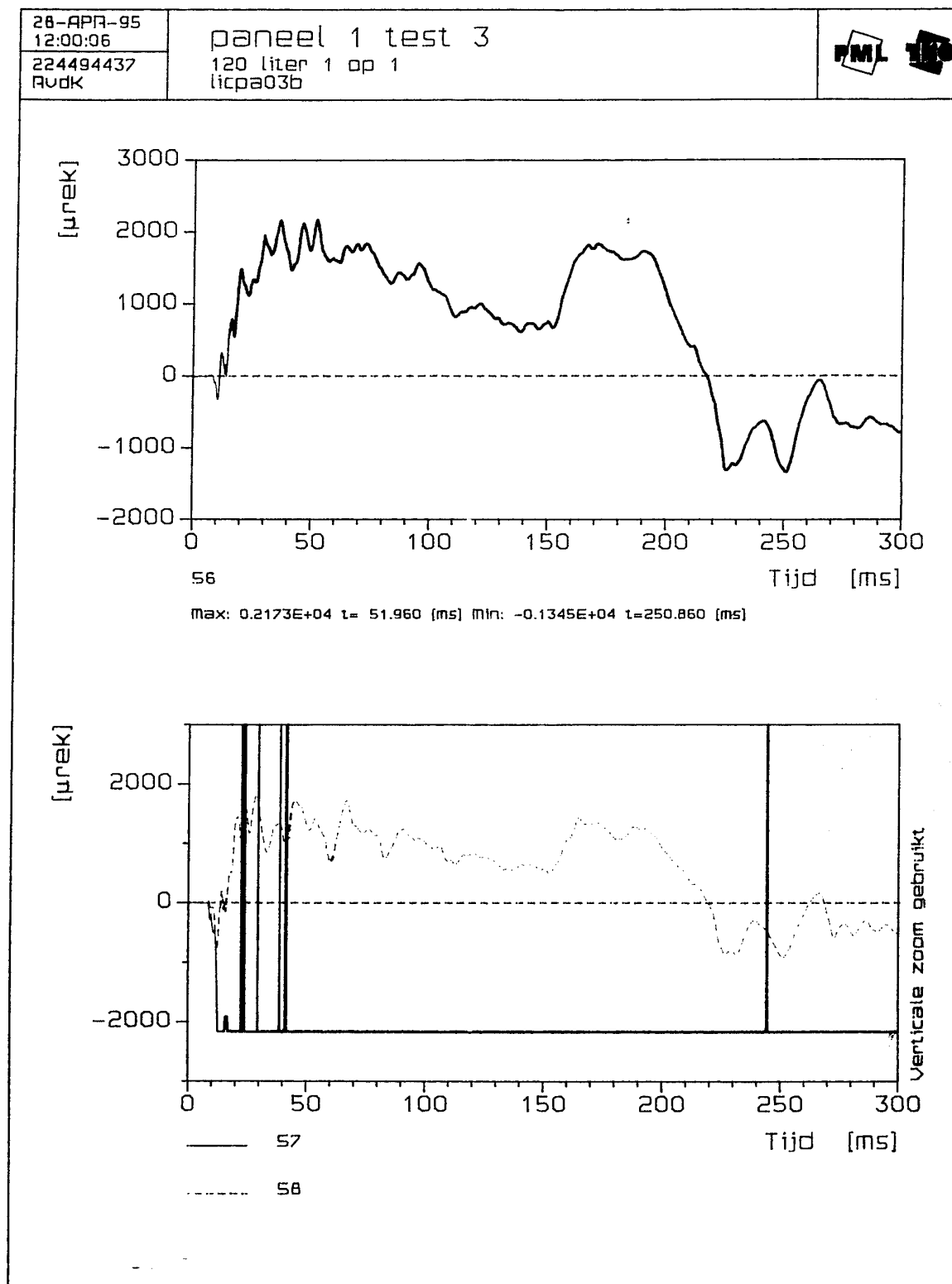




28-APR-95
12:00:01224494437
RvdK

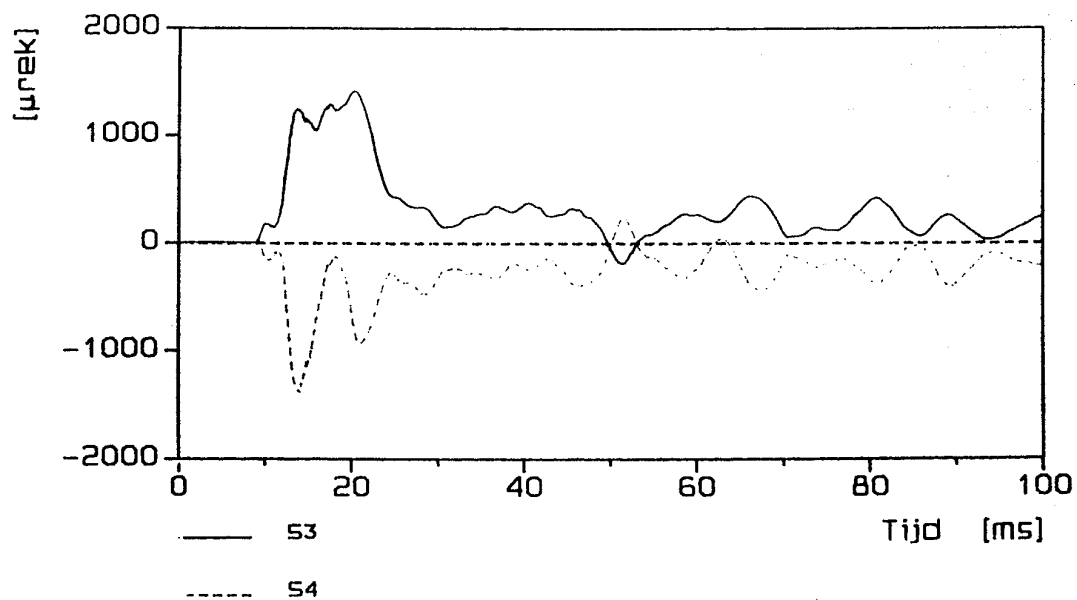
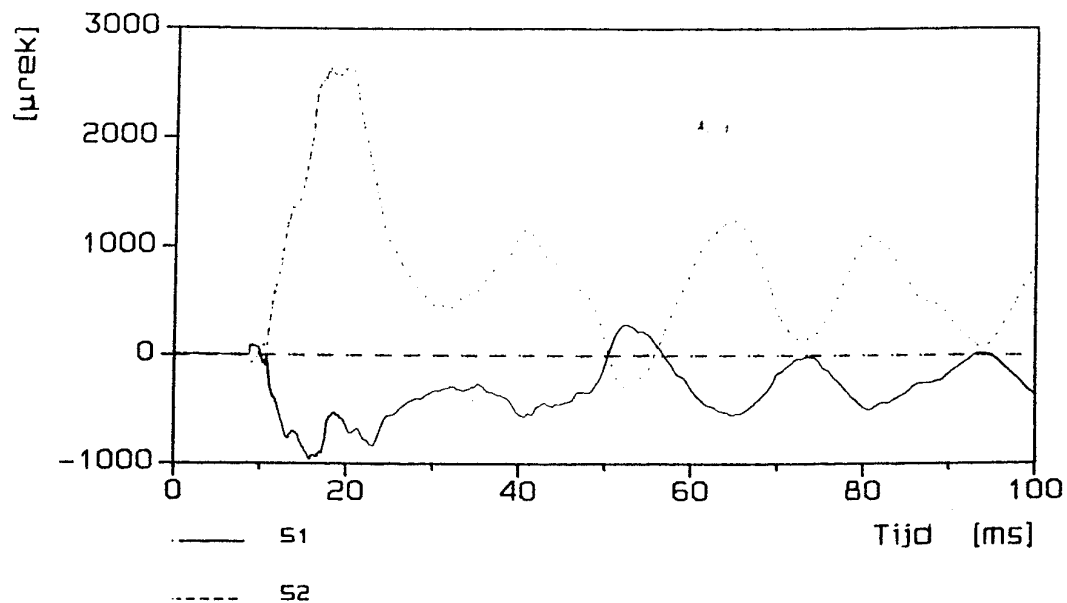
paneel 1 test 3

120 liter 1 op 1
licpa03b



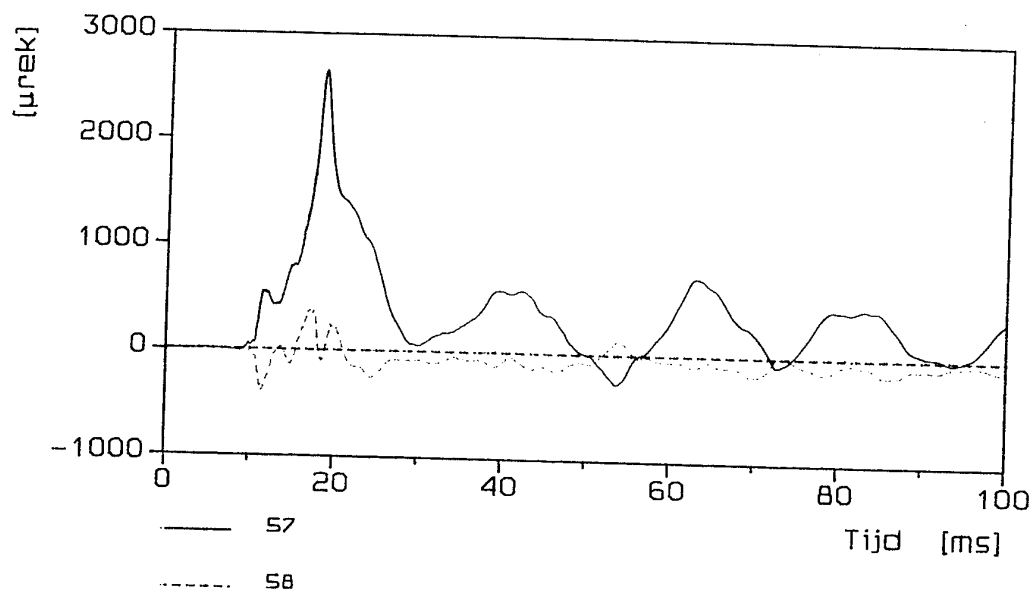
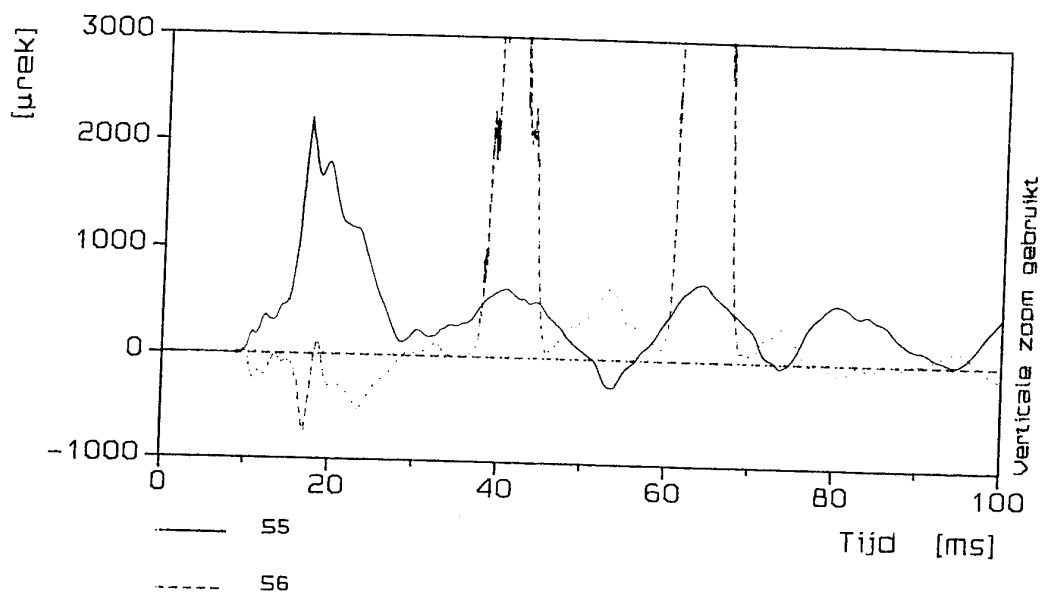
20-FEB-95
16:17:48224494437
RvdK

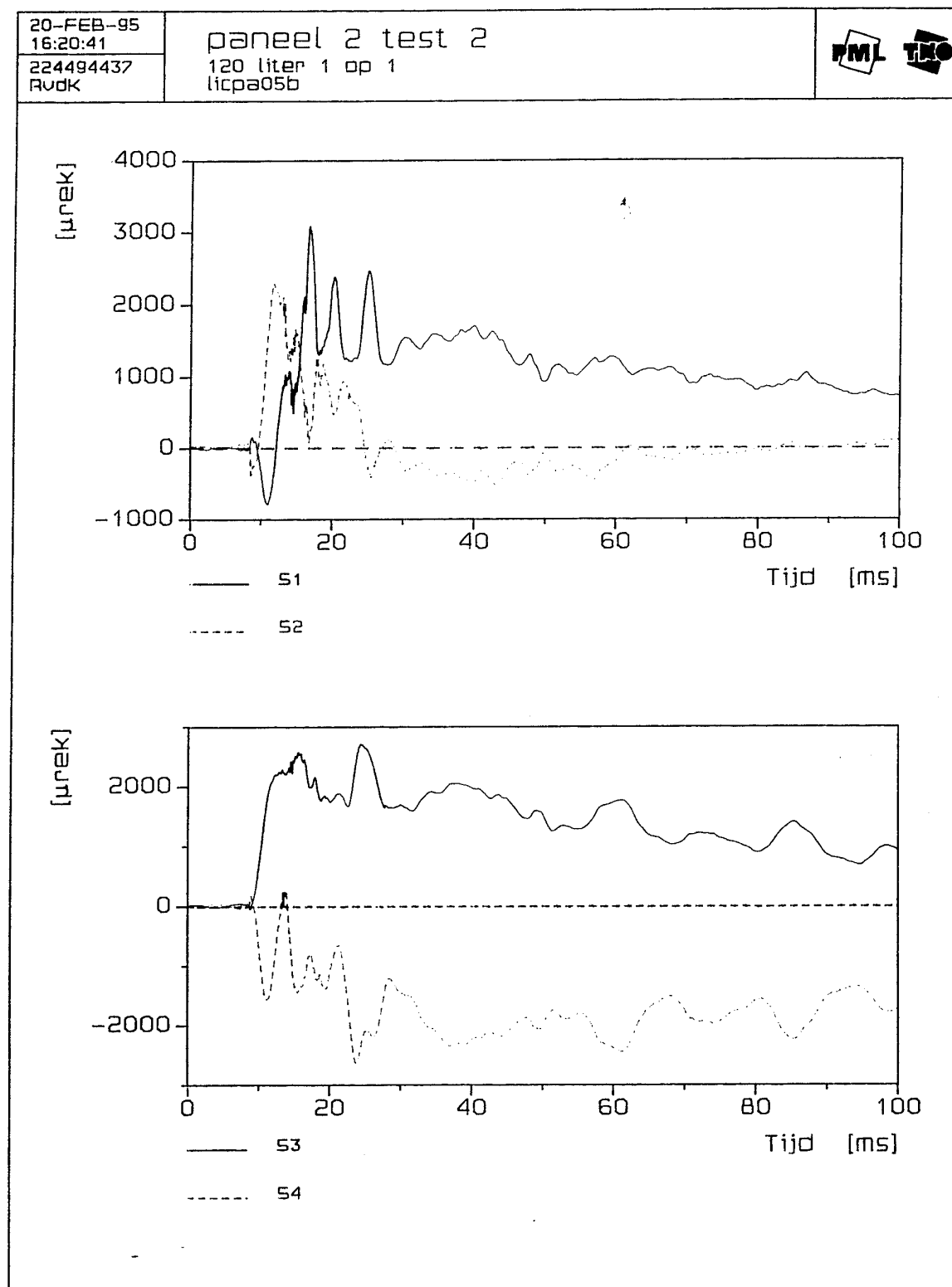
paneel 2 test 1

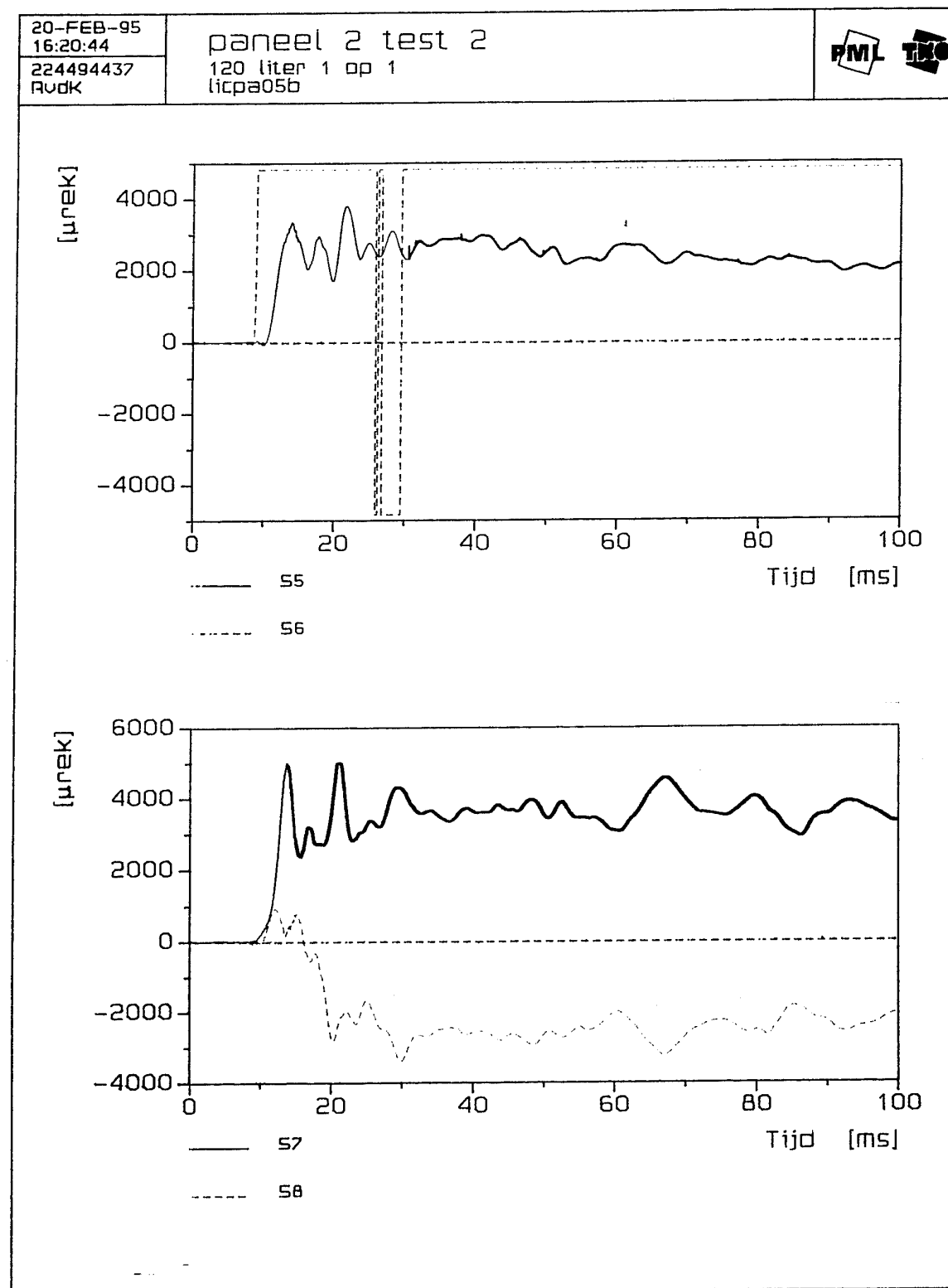
70 liter 1 op 2.5
licpa04b

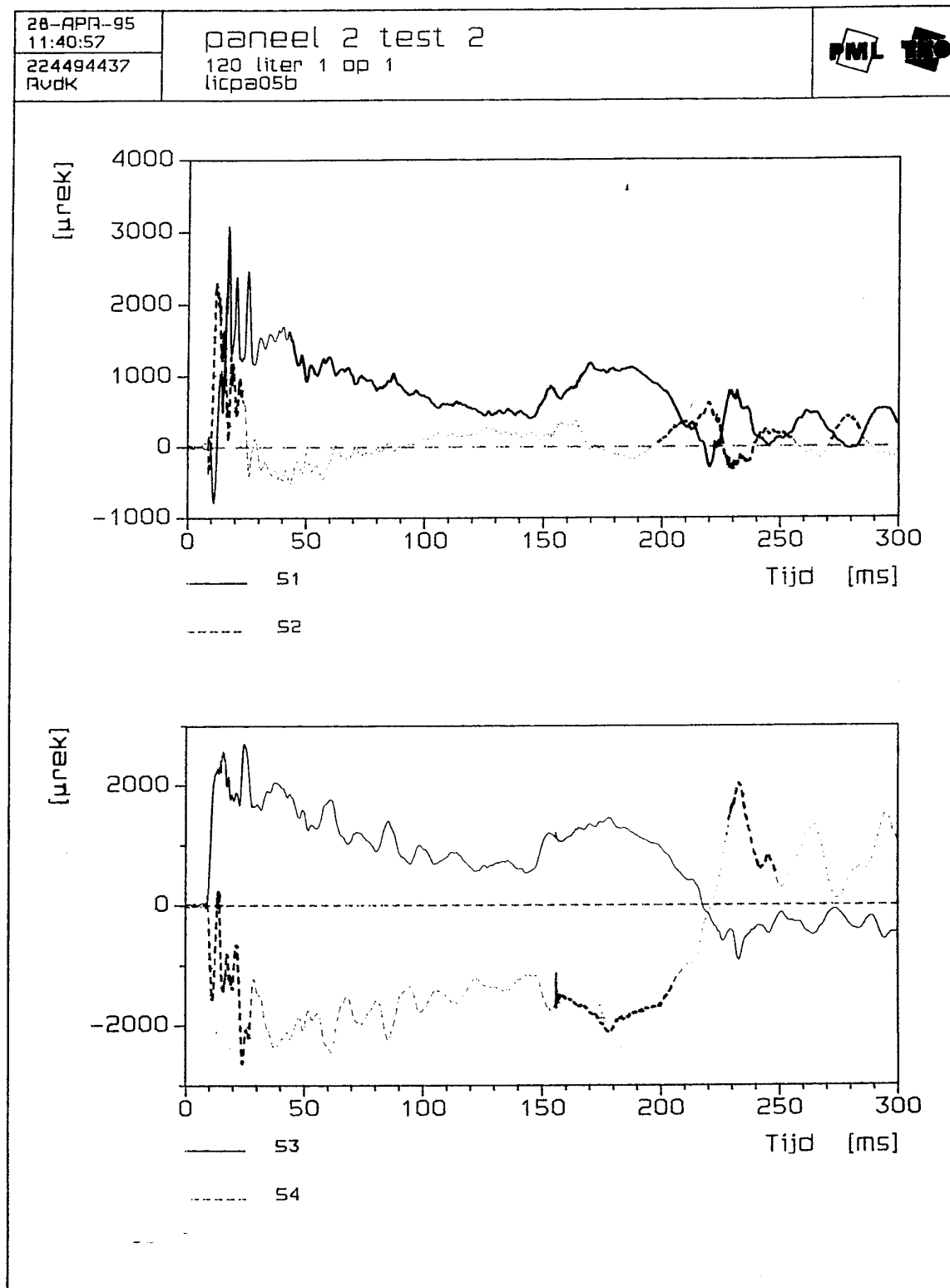
20-FEB-95
16:17:52224494437
RvdK

paneel 2 test 1

70 liter 1 op 2.5
licpa04b

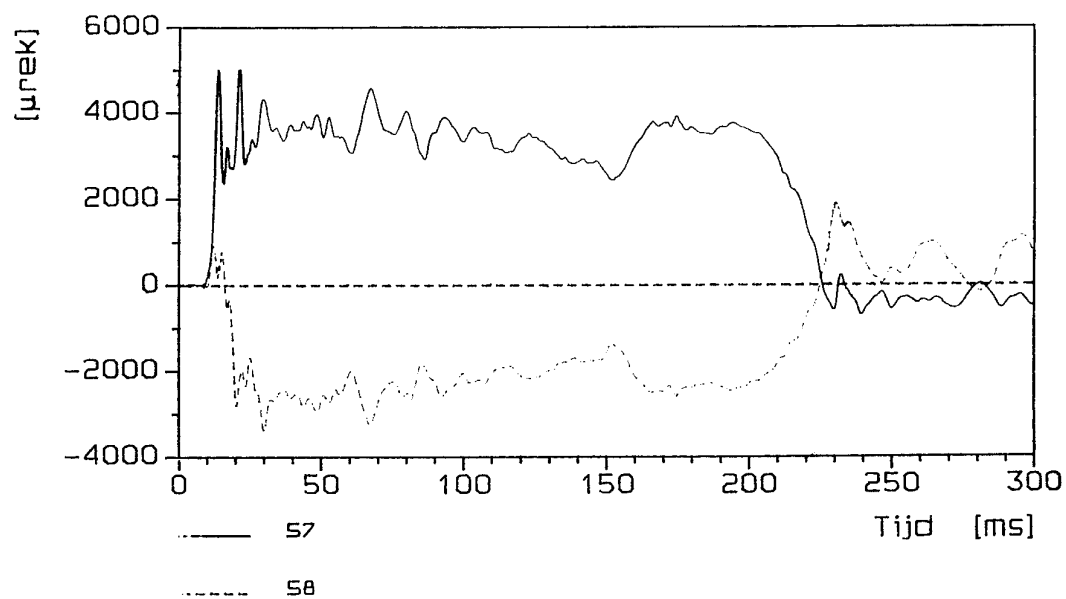
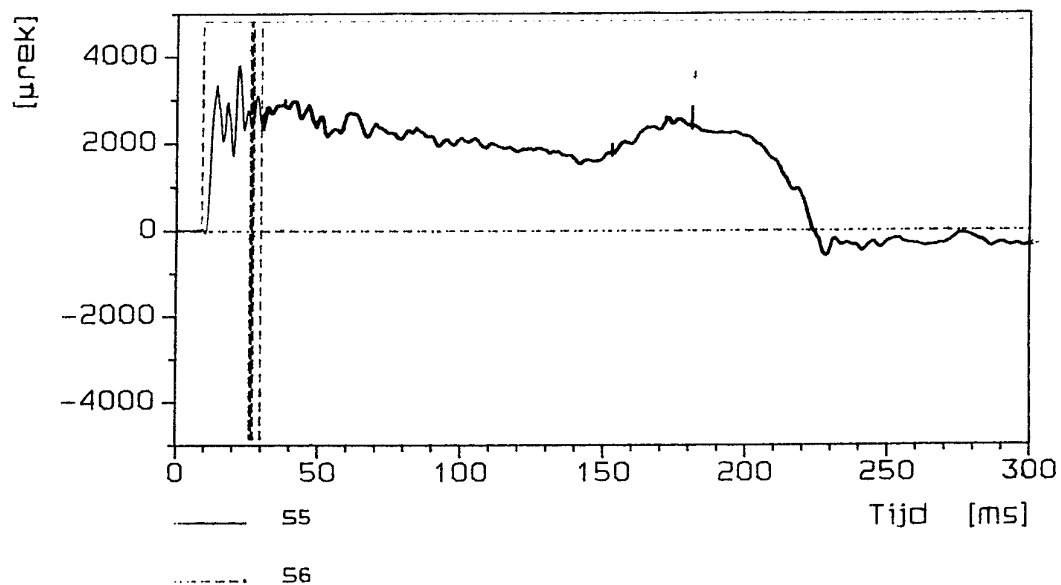






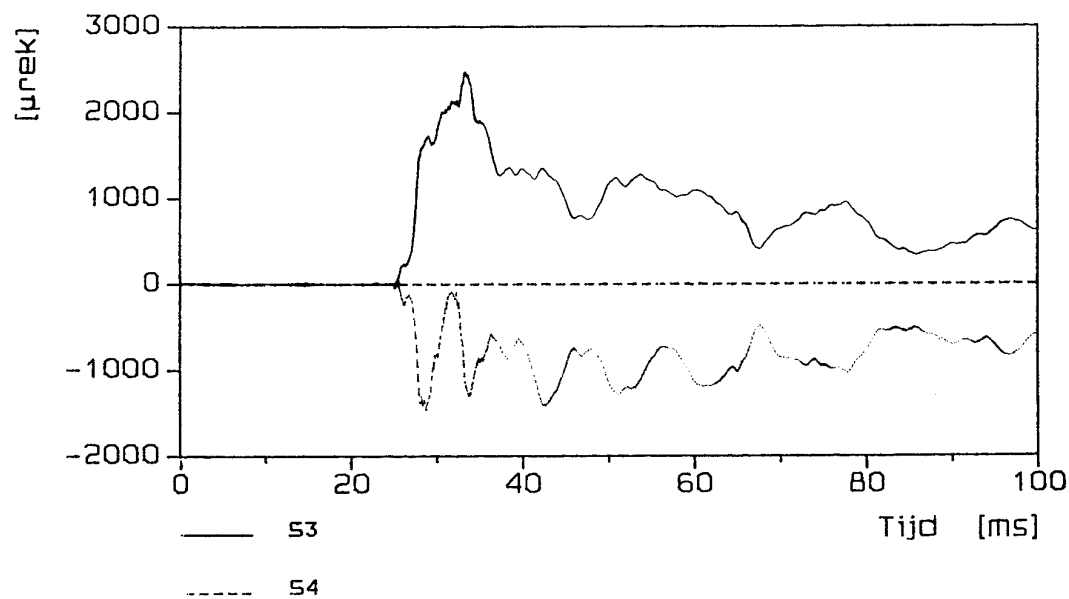
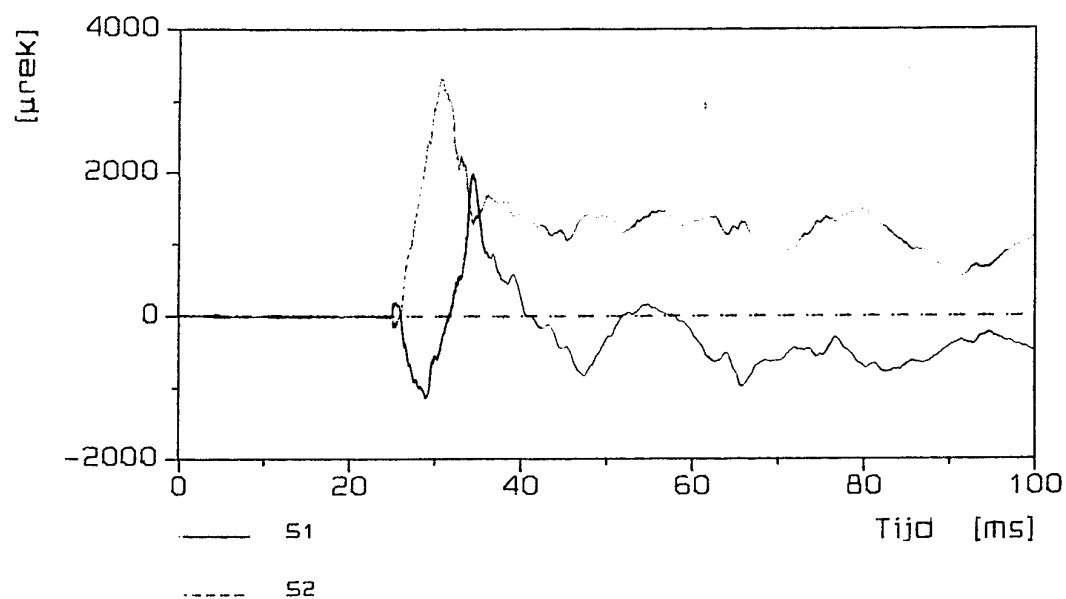
28-APR-95
11:41:02
224494437
RvdK

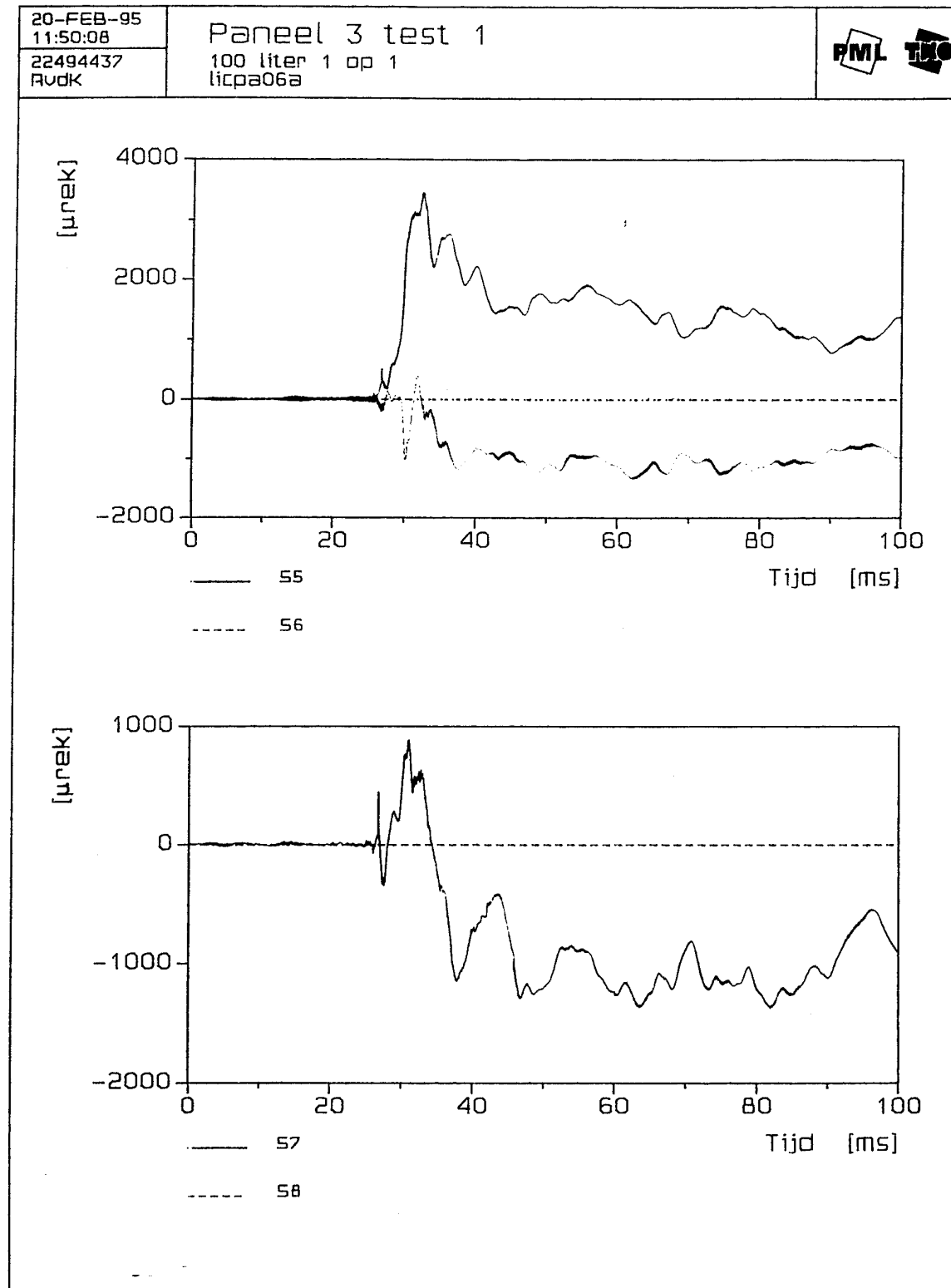
paneel 2 test 2
120 liter 1 op 1
licpa05b

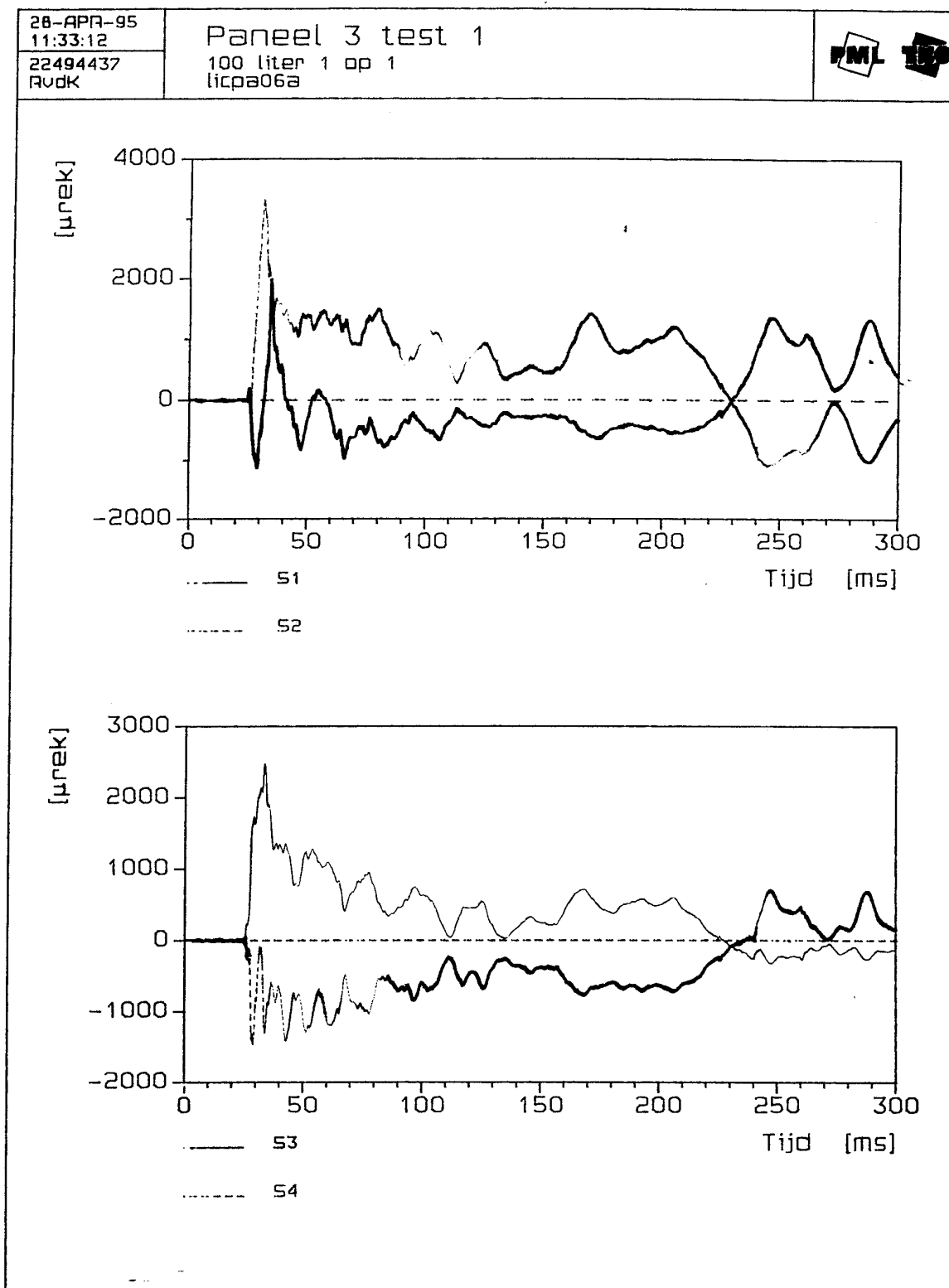


20-FEB-95
11:50:03
22494437
RvdK

Paneel 3 test 1
100 liter 1 op 1
licpa06a







28-APR-95

11:33:24

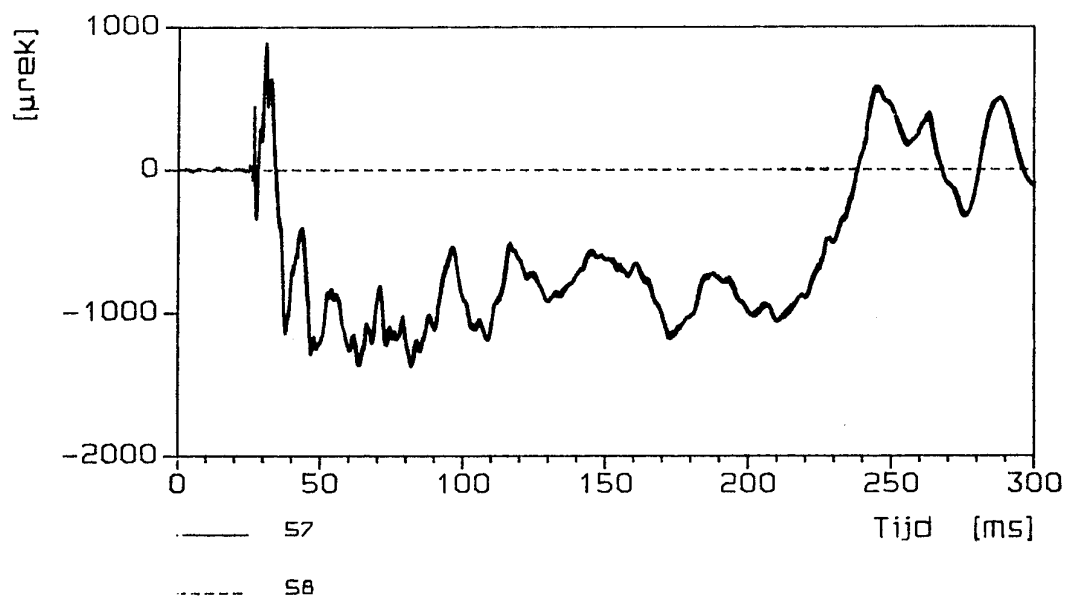
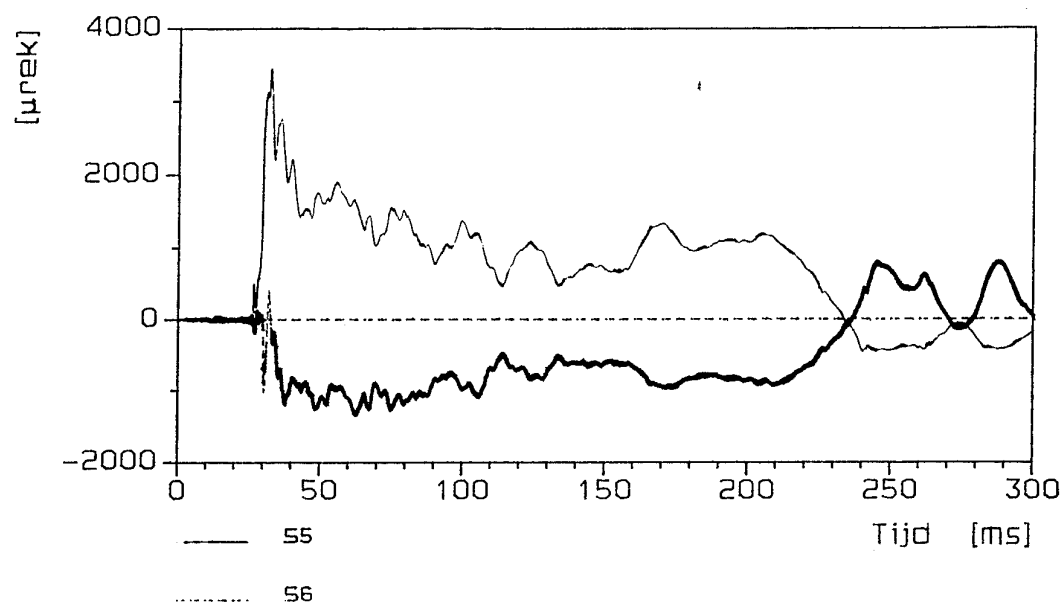
22494437

RVDK

Paneel 3 test 1

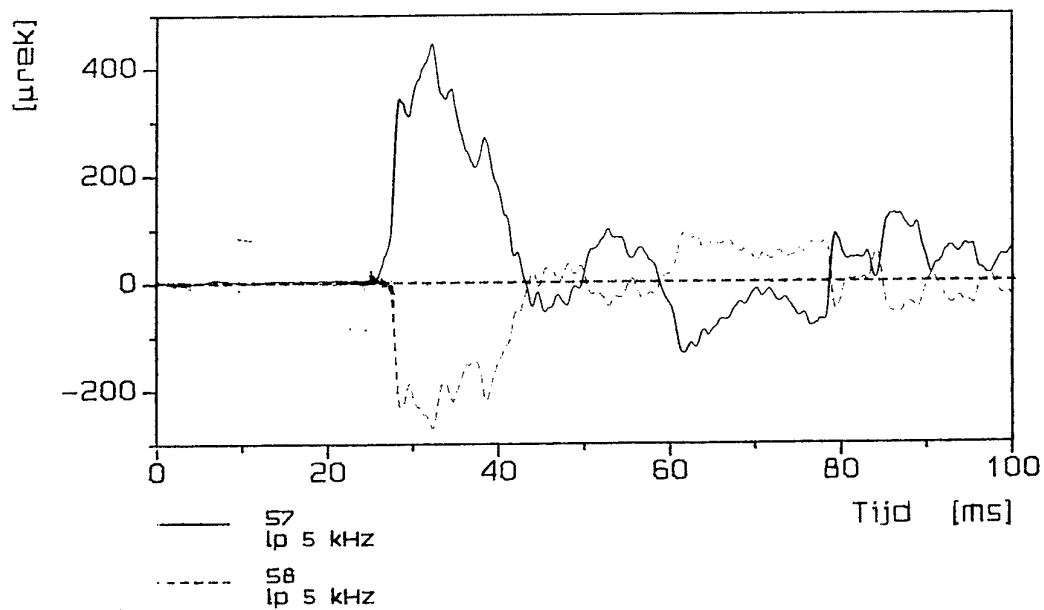
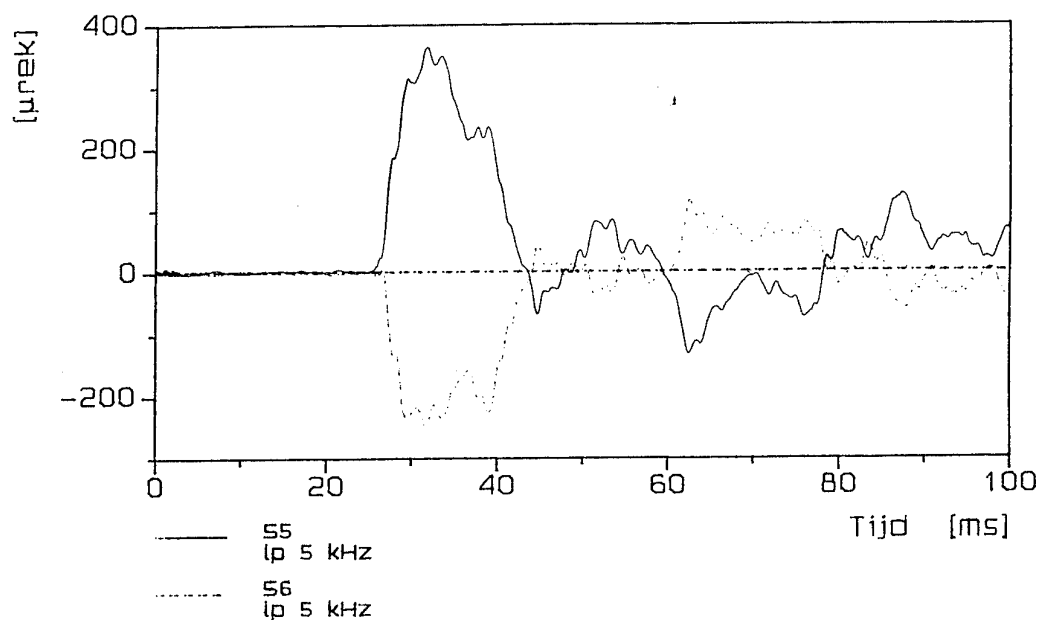
100 liter 1 op 1

licpa06a



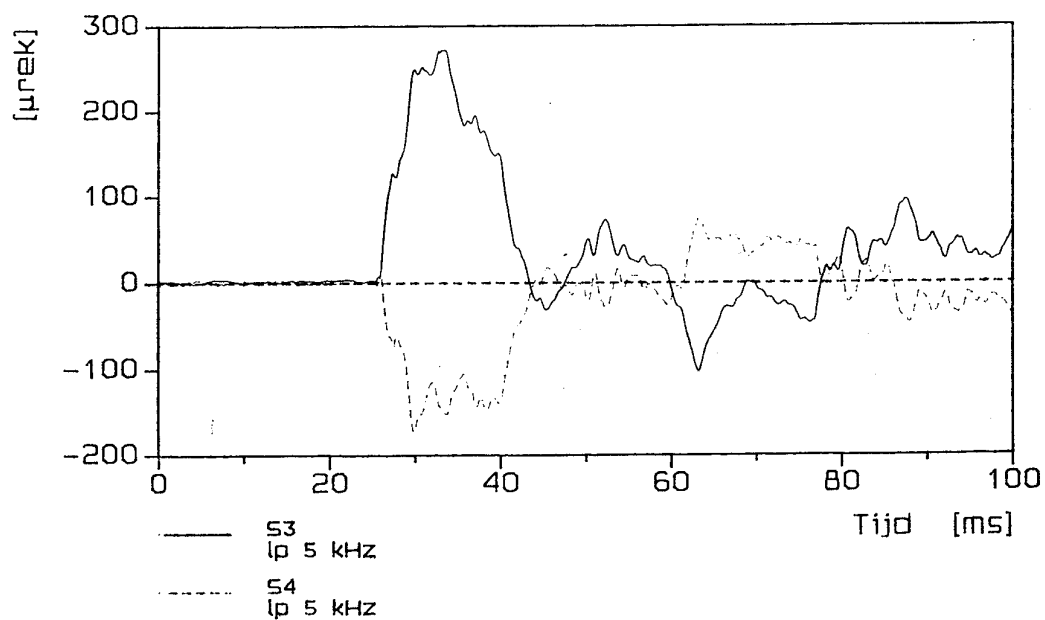
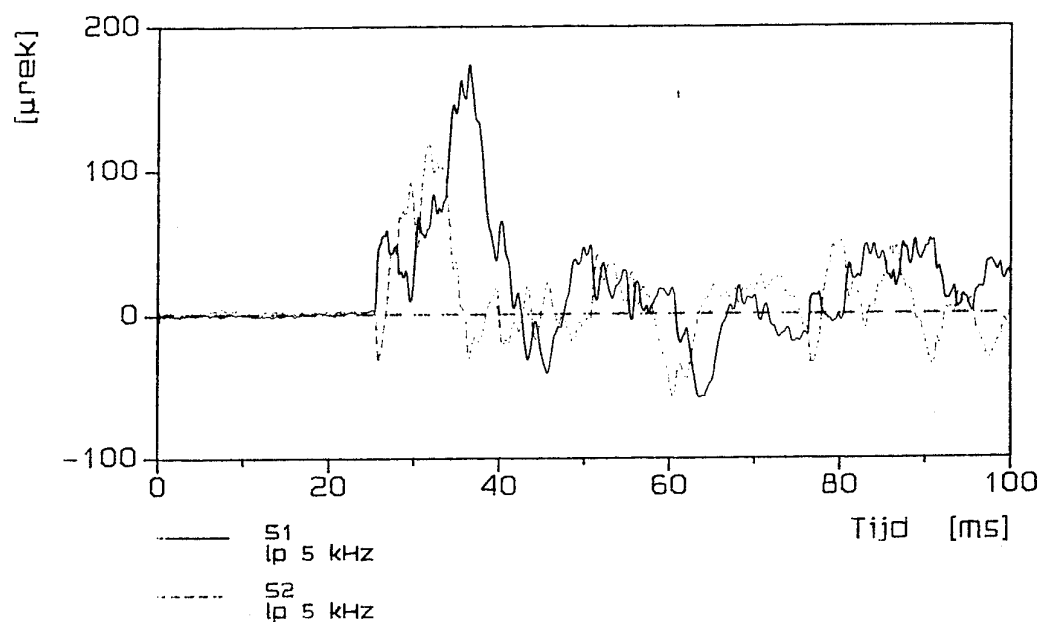
28-APR-95
16:08:06224494437
RvdK

Paneel 4 test 1

20 liter 1 op 2.5
licpa07c

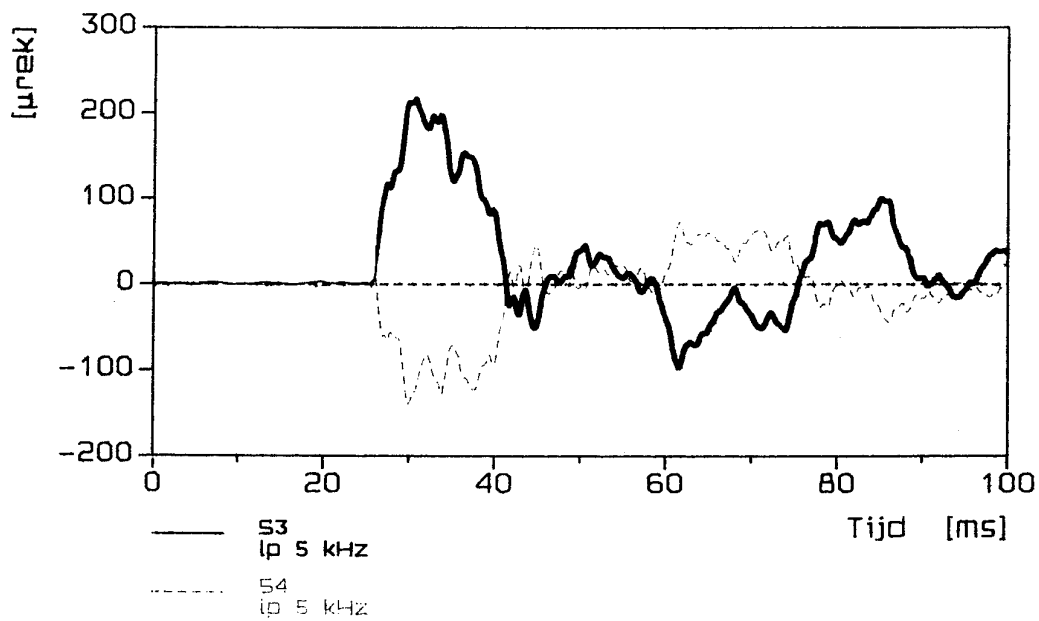
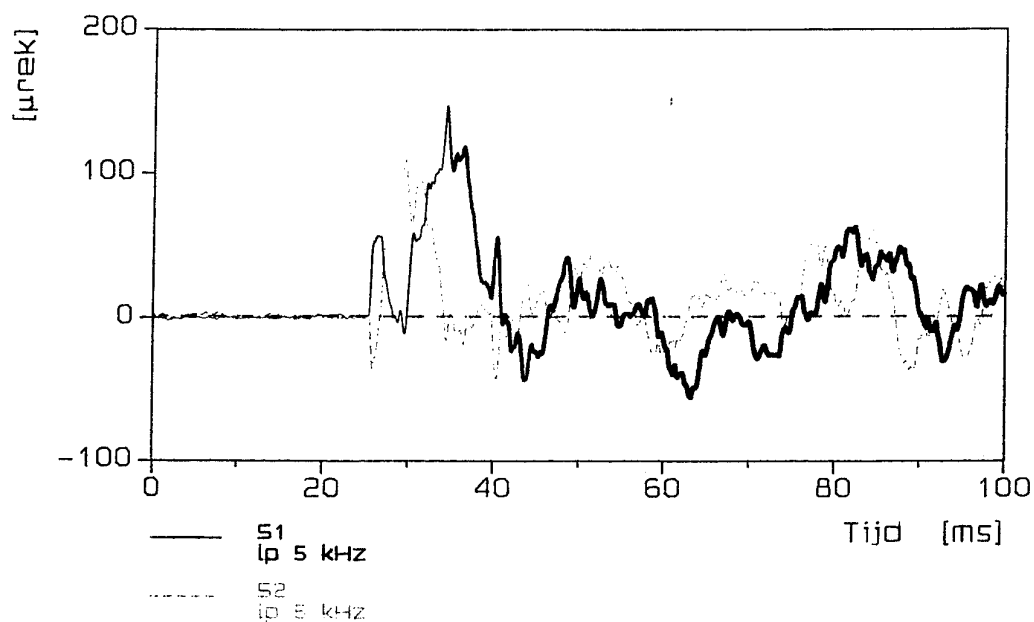
28-APR-95
16:08:02224494437
RvdK

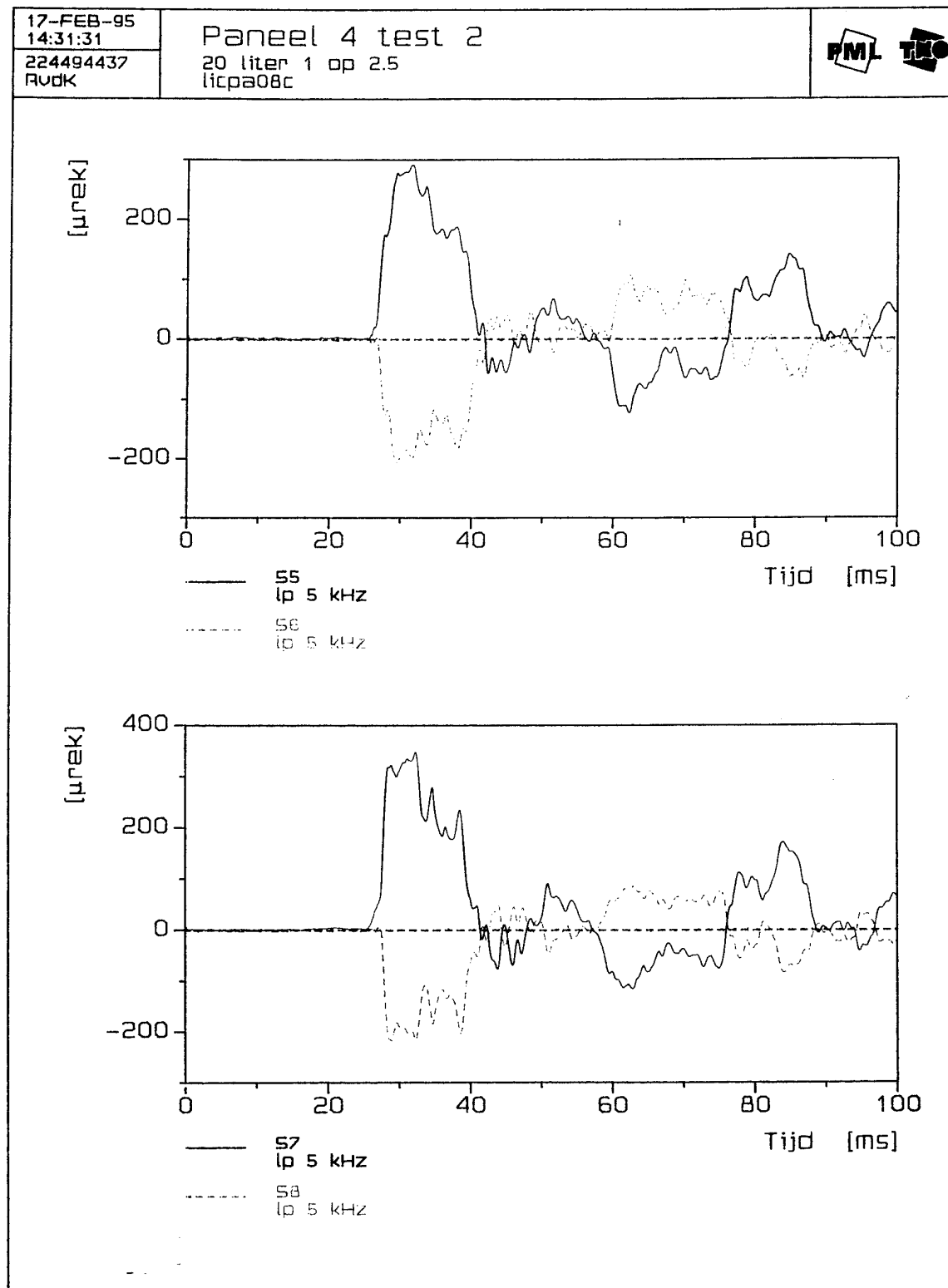
Paneel 4 test 1

20 liter 1 op 2.5
licpa07c

17-FEB-95
14:31:27224494437
RvdK

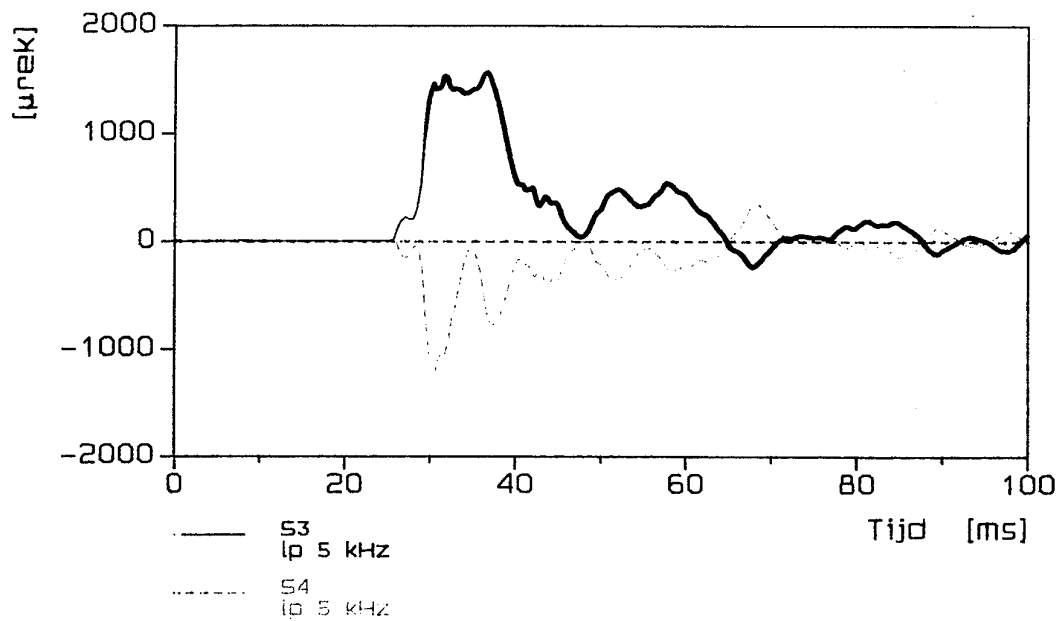
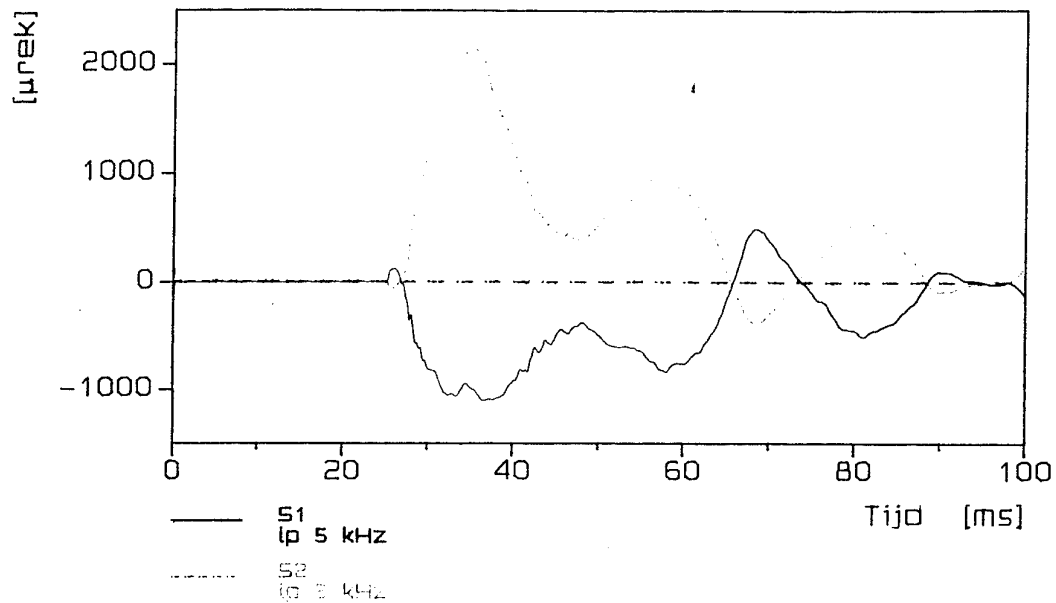
Paneel 4 test 2

20 liter 1 op 2.5
licpa08c



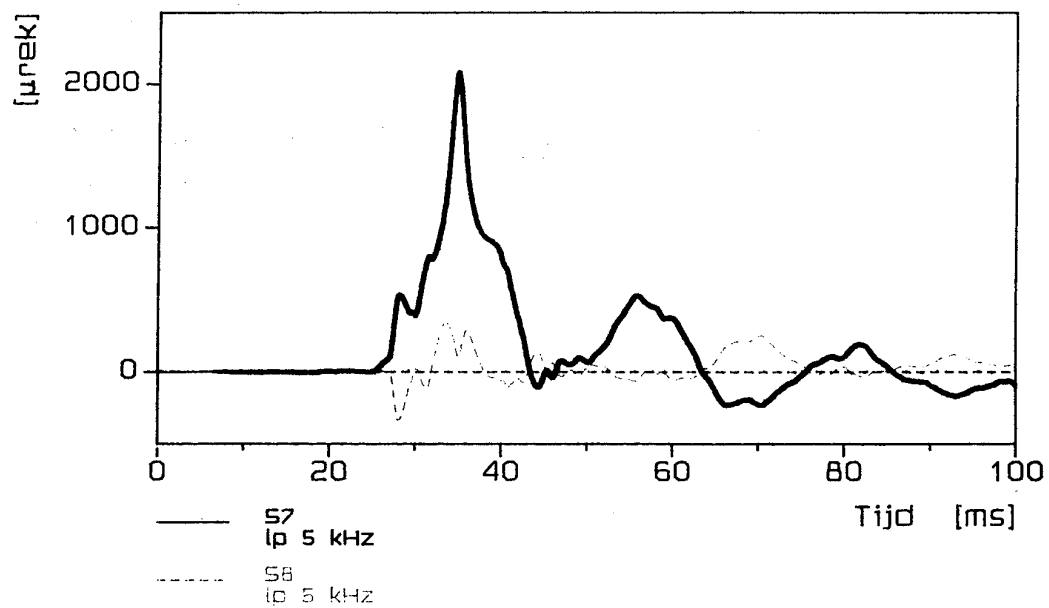
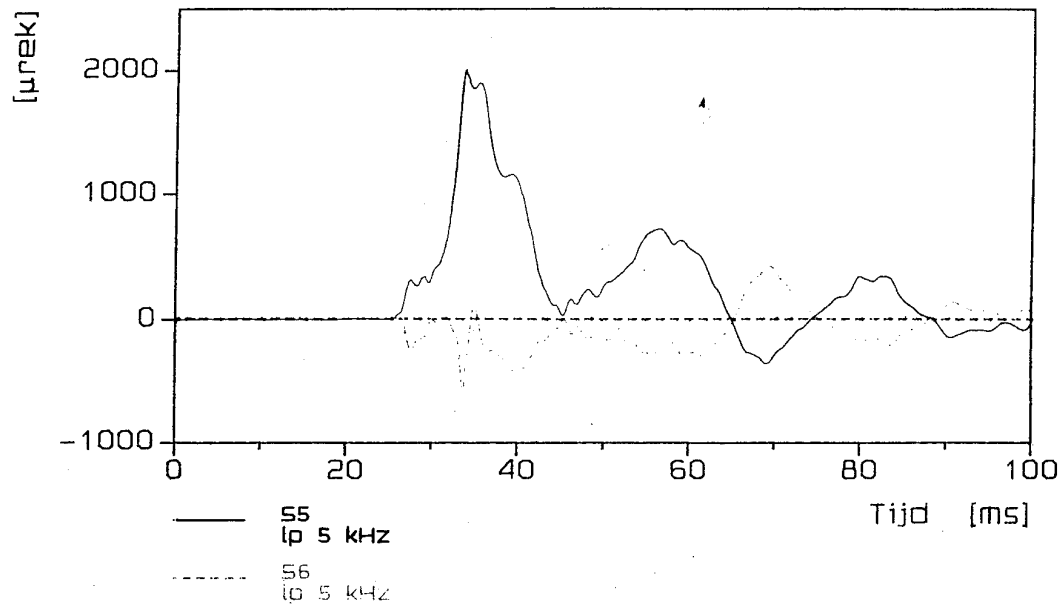
17-FEB-95
14:15:42224494437
RVDK

Paneel 4, test 3

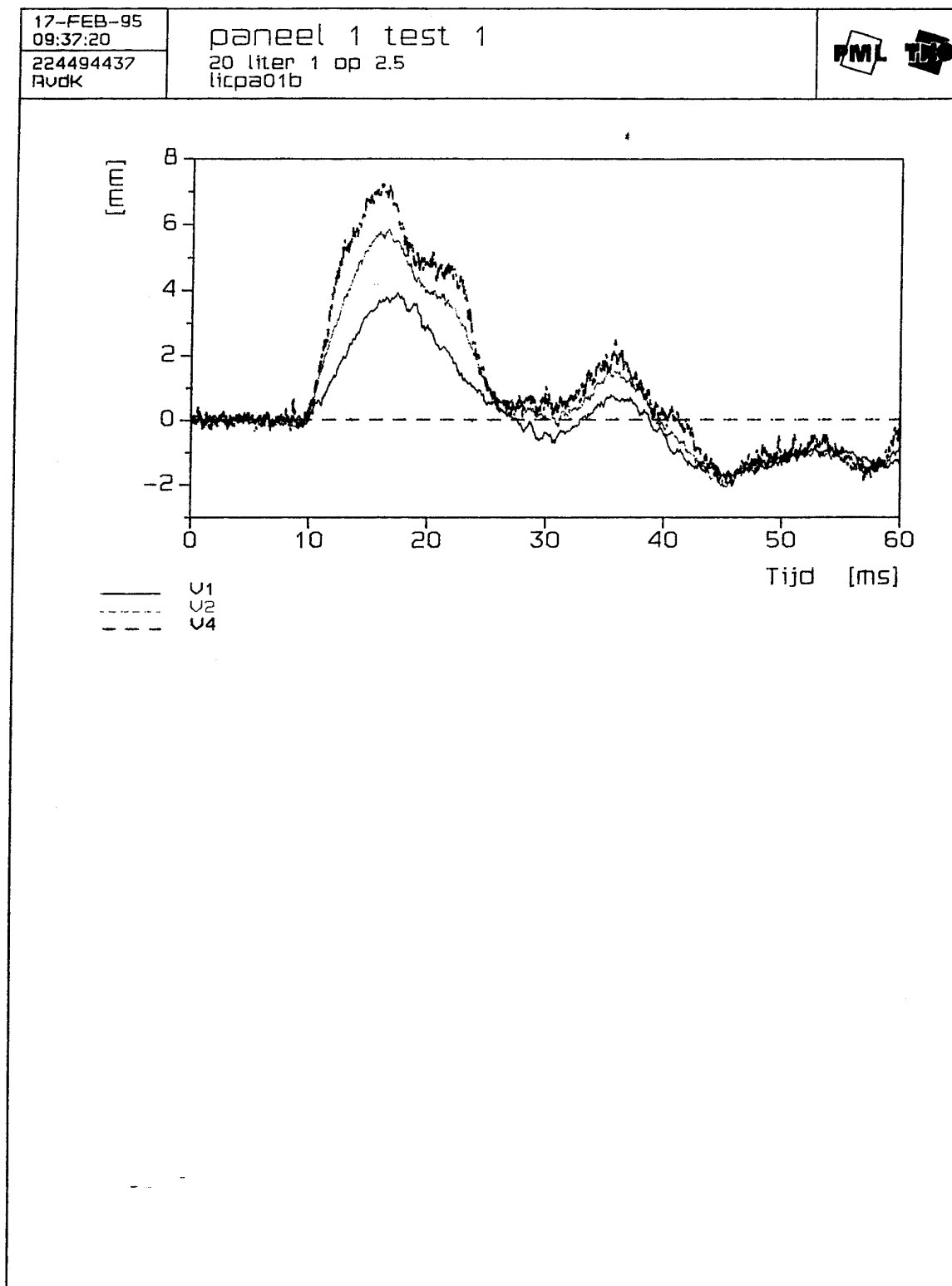
70 liter 1 op 2.5
licpa09c

17-FEB-95
14:15:45
224494437
RvdK

Paneel 4, test 3
70 liter 1 op 2.5
licpa09c



Bijlage C Grafische weergave van de verplaatsings signalen



20-FEB-95

14:10:38

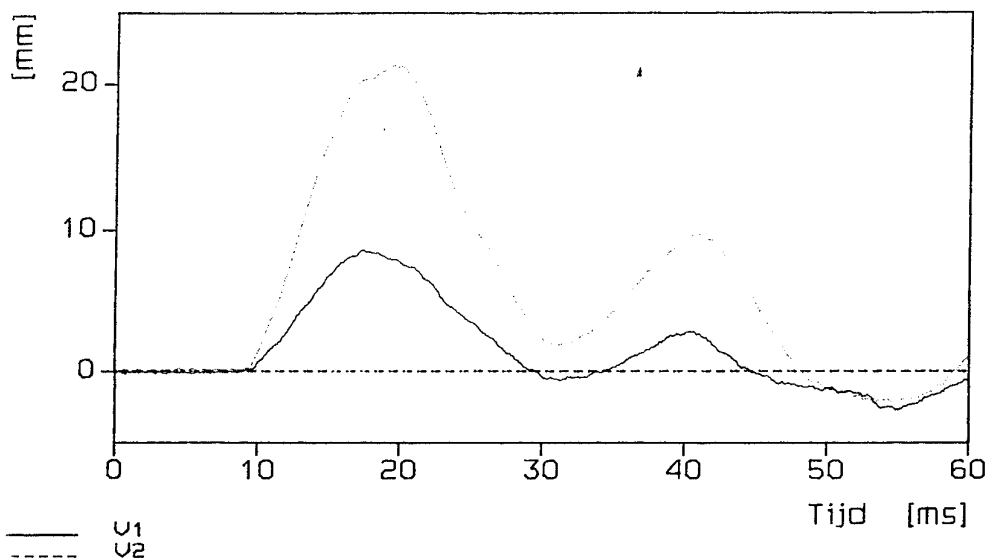
224494437

RvdK

paneel 1 TEST 2

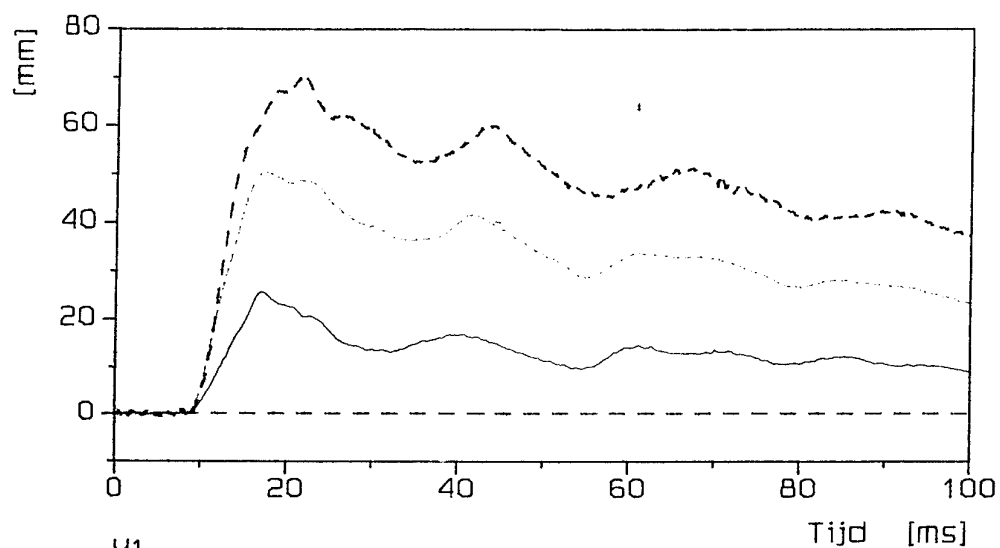
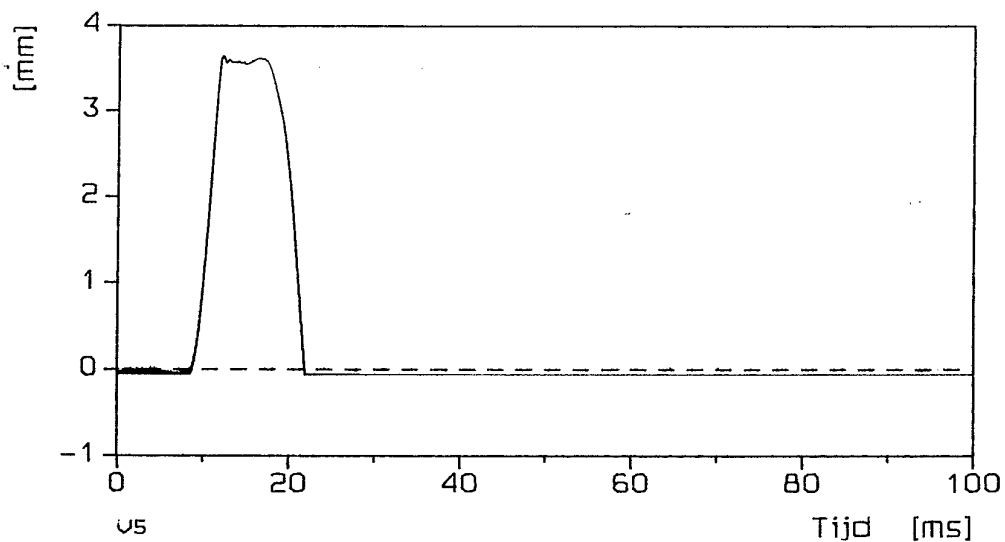
70 liter 1 op 2.5

licpa02b



28-APR-95
13:55:54RvdK
224494437

Paneel 1, test 3

120 liter 1 op 1
licpa03c— U1
... U2
--- U3

max: 0.3646E+01 t= 12.130 [ms] Min: -0.5777E-01 t= 99.120 [ms]

28-APR-95

12:01:09

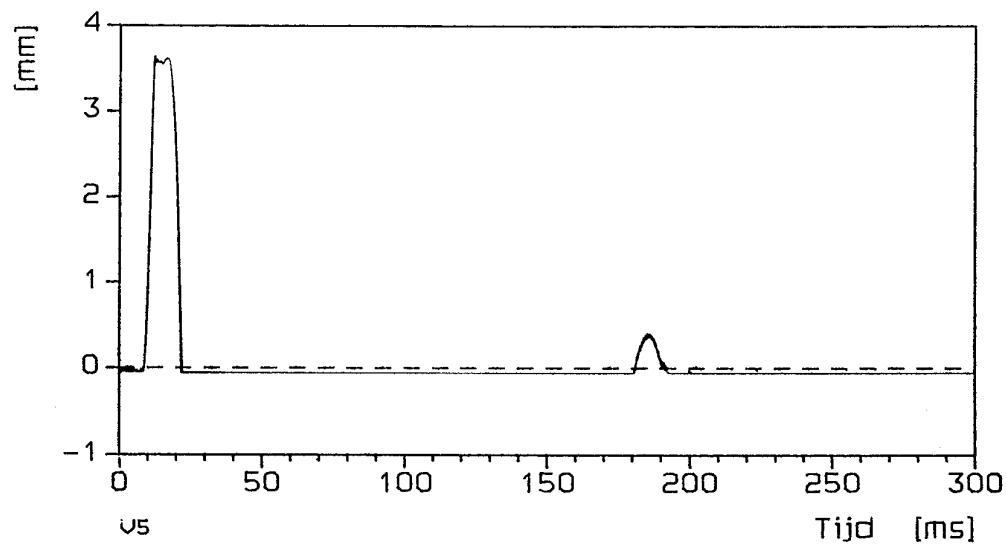
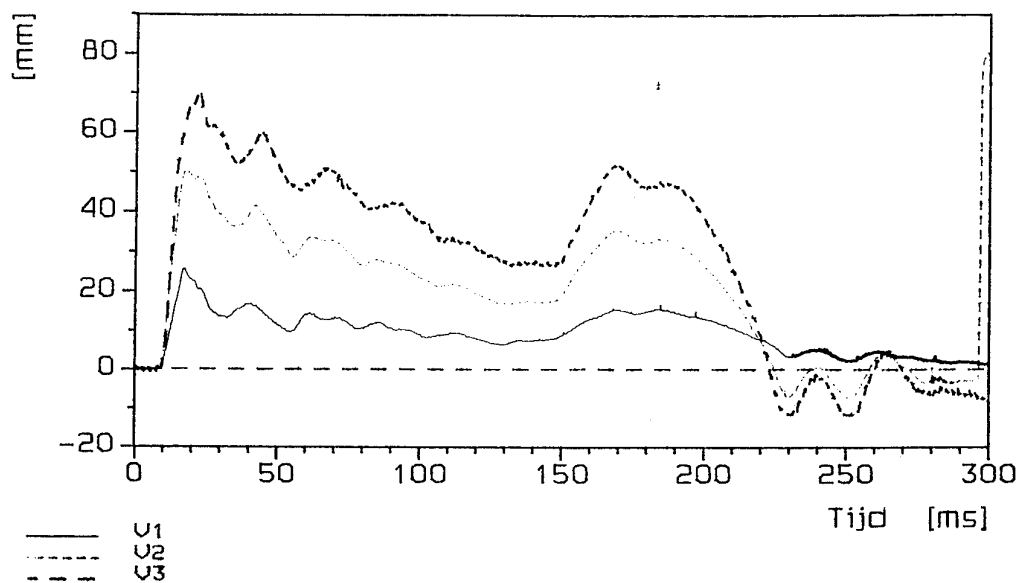
RvdK

224494437

Paneel 1, test 3

120 liter 1 op 1

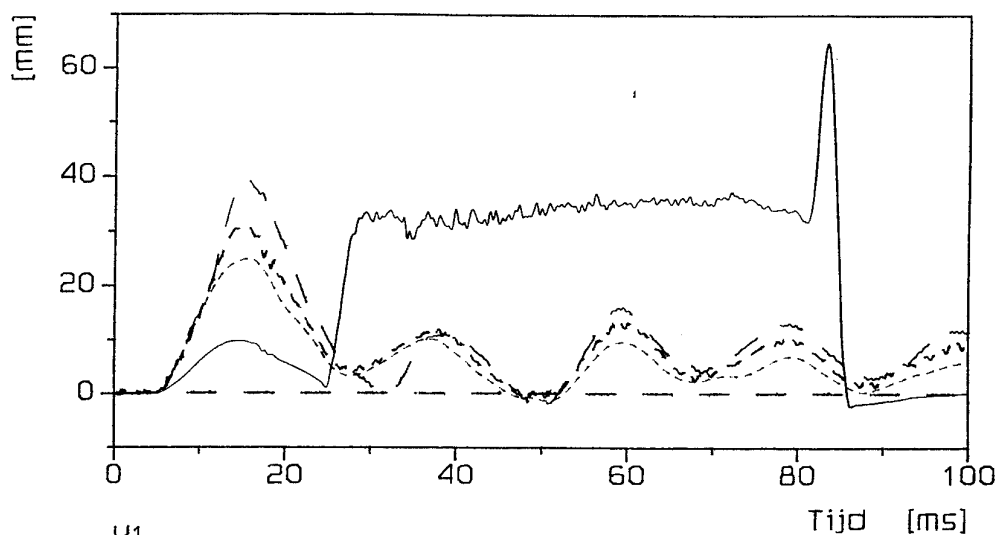
licpa03c



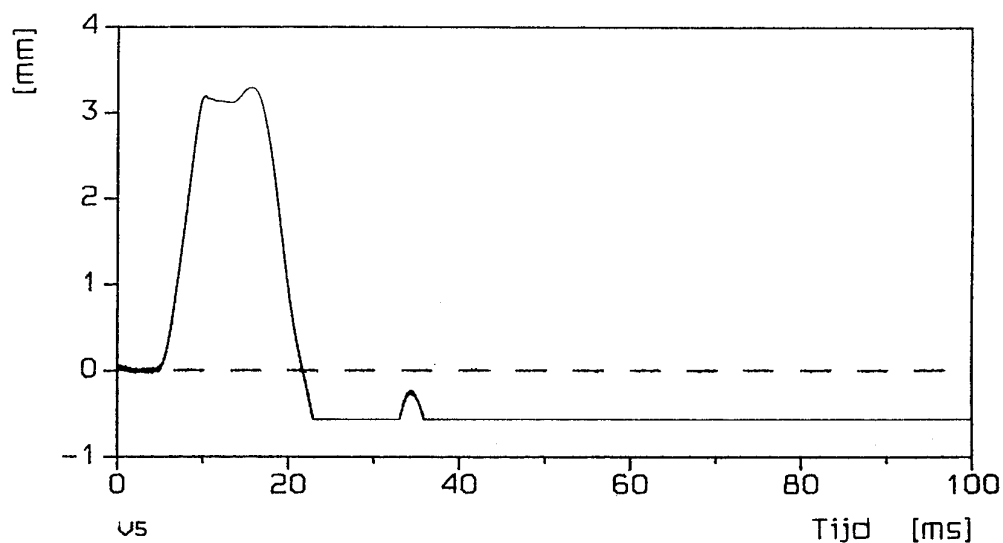
Max: 0.3646E+01 t= 12.130 [ms] Min: -0.5777E-01 t=173.930 [ms]

17-FEB-95
15:41:35224494437
RvdK

paneel 2 test 1

70 liter 1 op 2.5
licpa04c

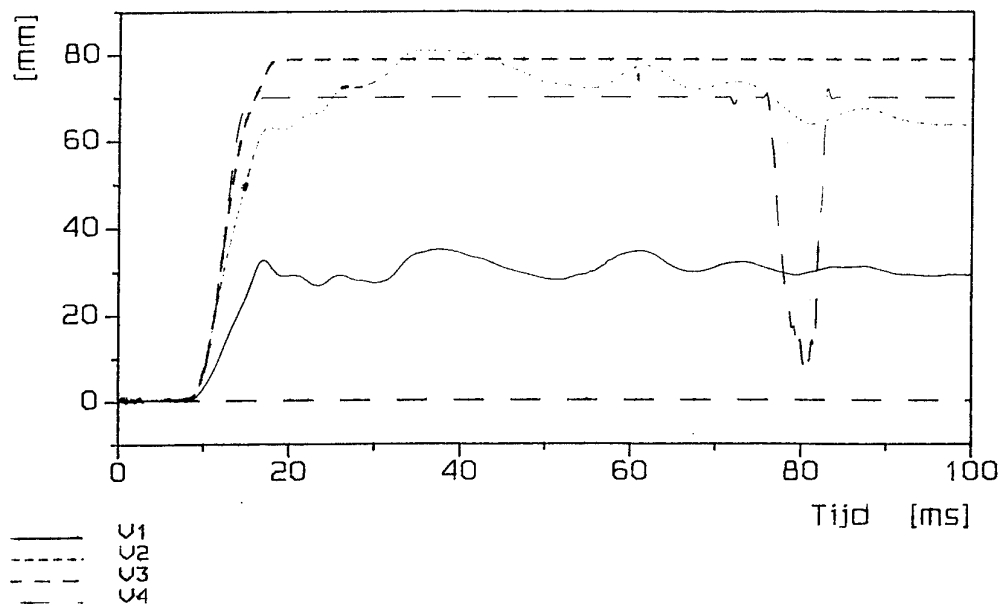
— U1
--- U2
... U3
- . - U4



Max: 0.3294E+01 t= 15.790 [ms] Min: -0.5683E+00 t= 29.510 [ms]

28-APR-95
16:13:40224494437
RvdK

paneel 2 proef 2

120 liter 1 op 1
licpa05c

28-APR-95

11:42:31

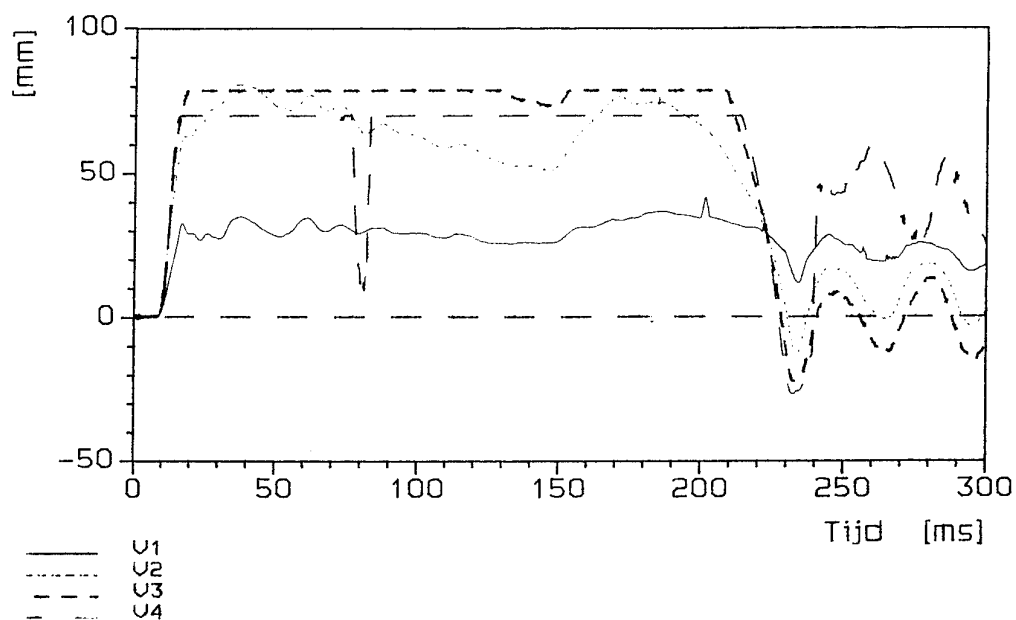
224494437

RvdK

paneel 2 proef 2

120 liter 1 op 1

licpa05c



20-FEB-95

14:16:16

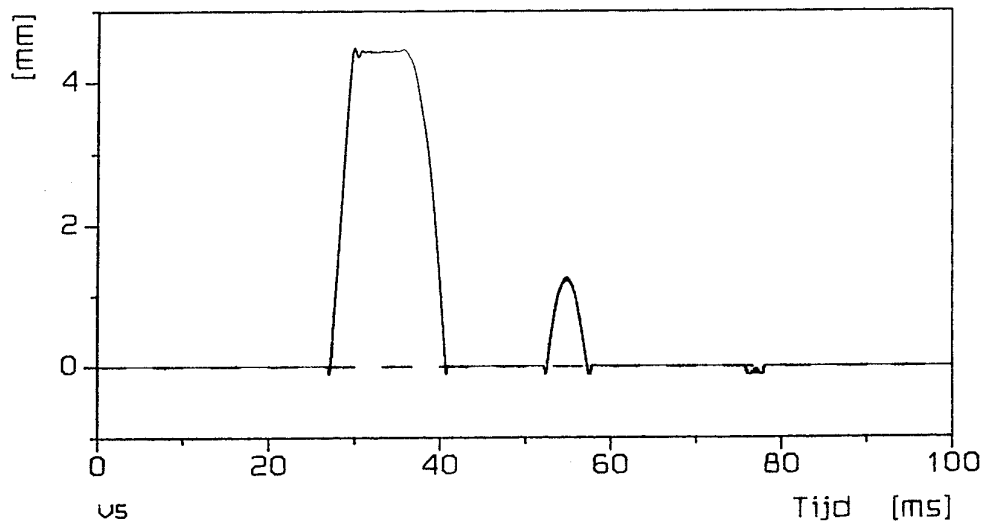
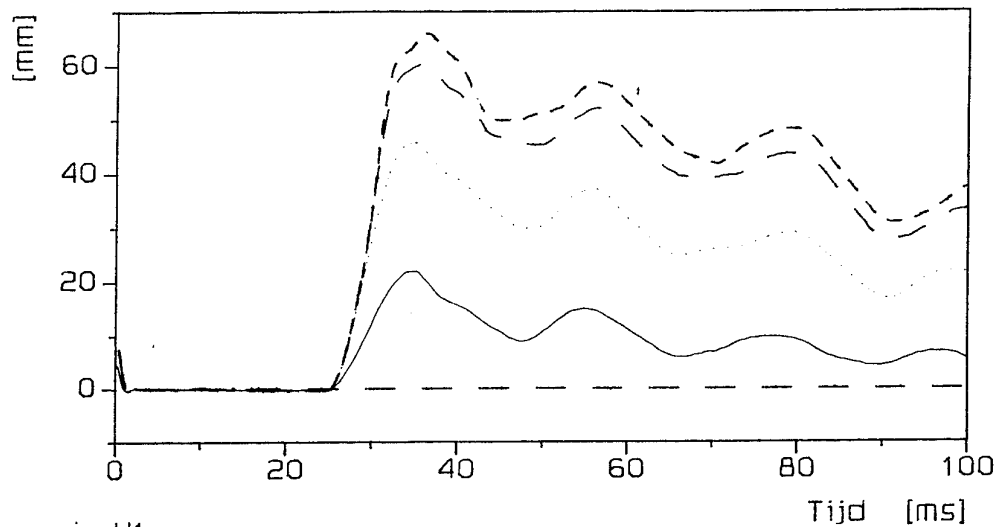
224494437

RvdK

Paneel 3 test 1

100 liter 1 op 1

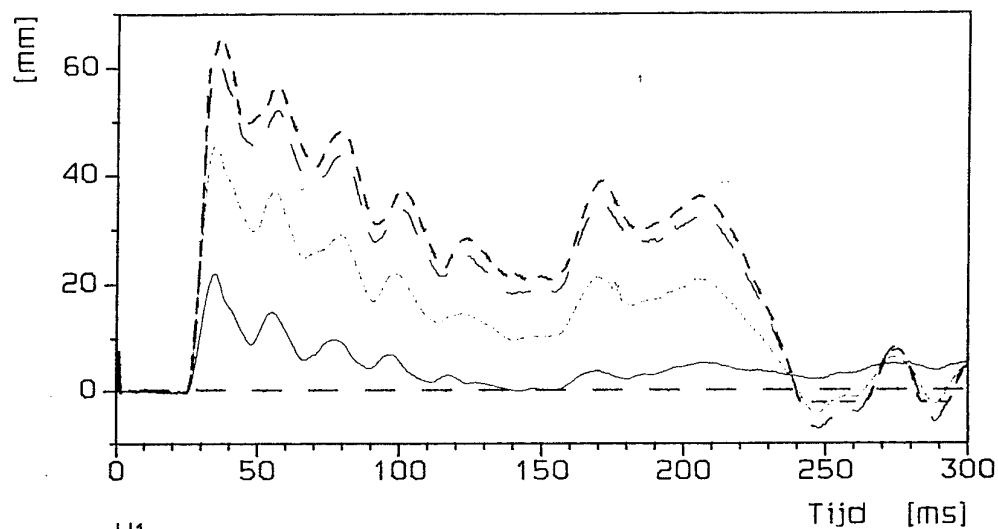
licpa06b



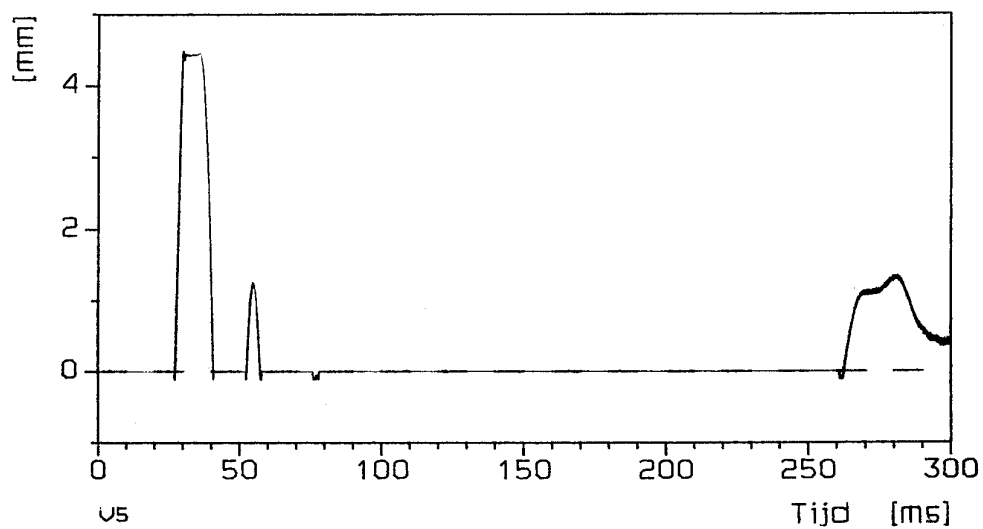
max: 0.4494E+01 t= 29.935 [ms] Min: -0.1189E+00 t= 57.580 [ms]

28-APR-95
11:38:01

Paneel 3 test 1

224494437
RvdK100 liter 1 op 1
licpa06b

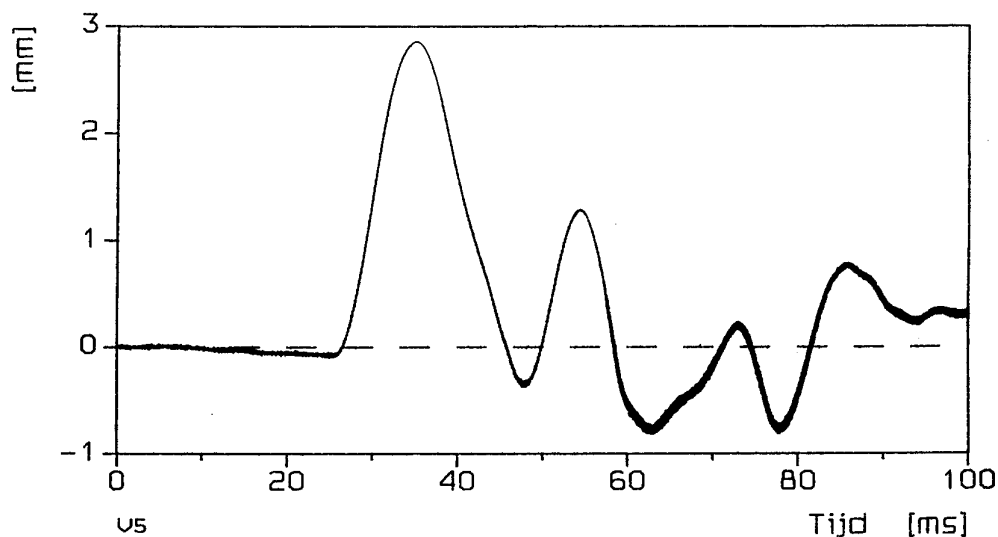
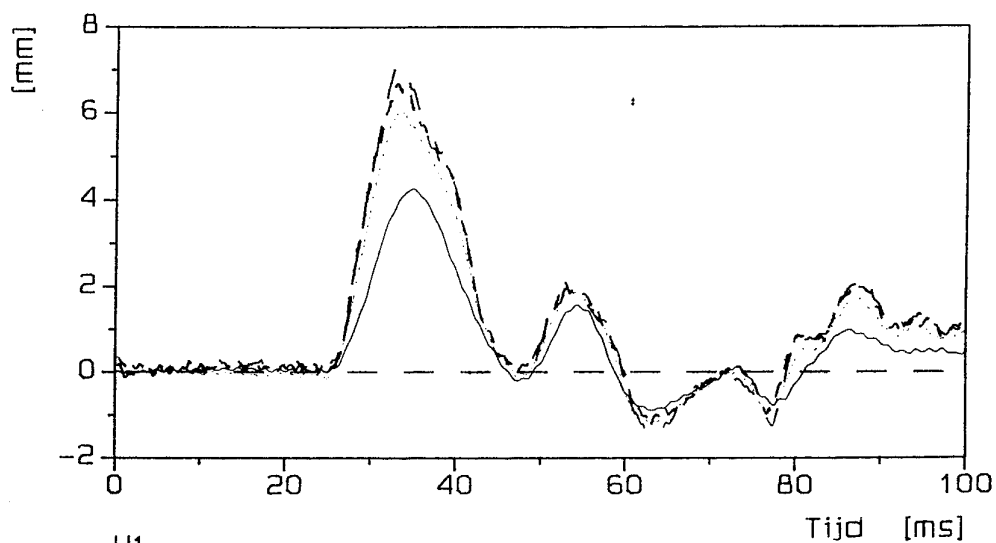
— U1
--- U2
... U3
- . - U4



max: 0.4494E+01 t= 29.935 [ms] Min: -0.1189E+00 t= 57.580 [ms]

20-FEB-95
14:13:12224494437
RvdK

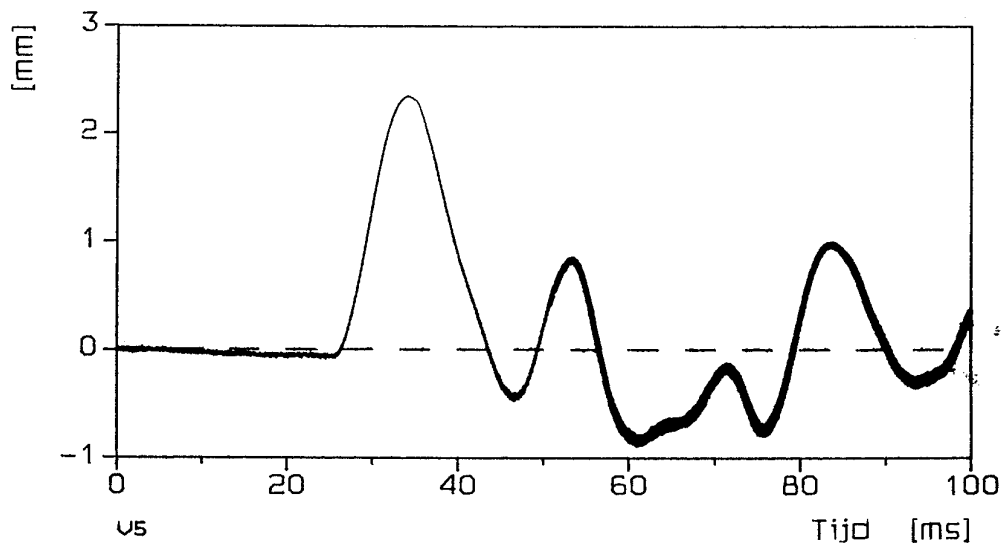
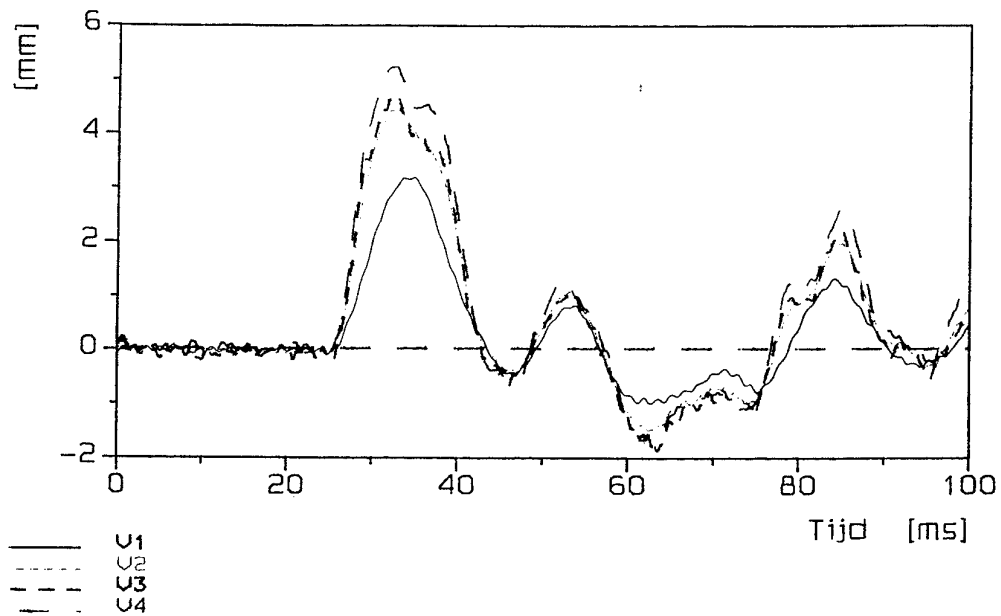
Paneel 4 test 1

20 liter 1 op 2.5
licpa07b

max: 0.2862E+01 t= 35.030 [ms] min: -0.8173E+00 t= 62.870 [ms]

17-FEB-95
14:25:22
224494437
RvdK

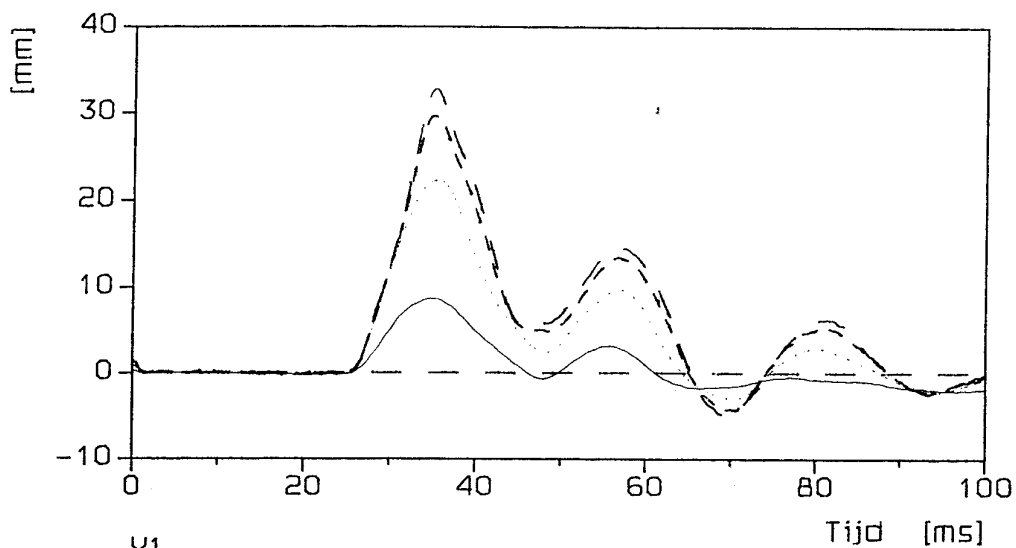
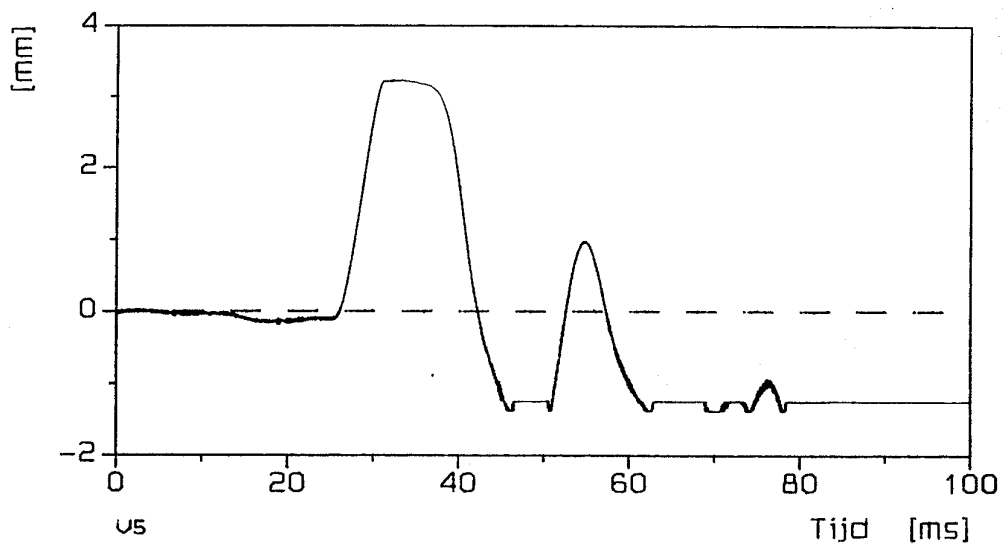
Paneel 4 test 2
20 liter 1 op 2.5
licpa08b



max: 0.2350E+01 t= 34.015 [ms] Min: -0.8871E+00 t= 61.000 [ms]

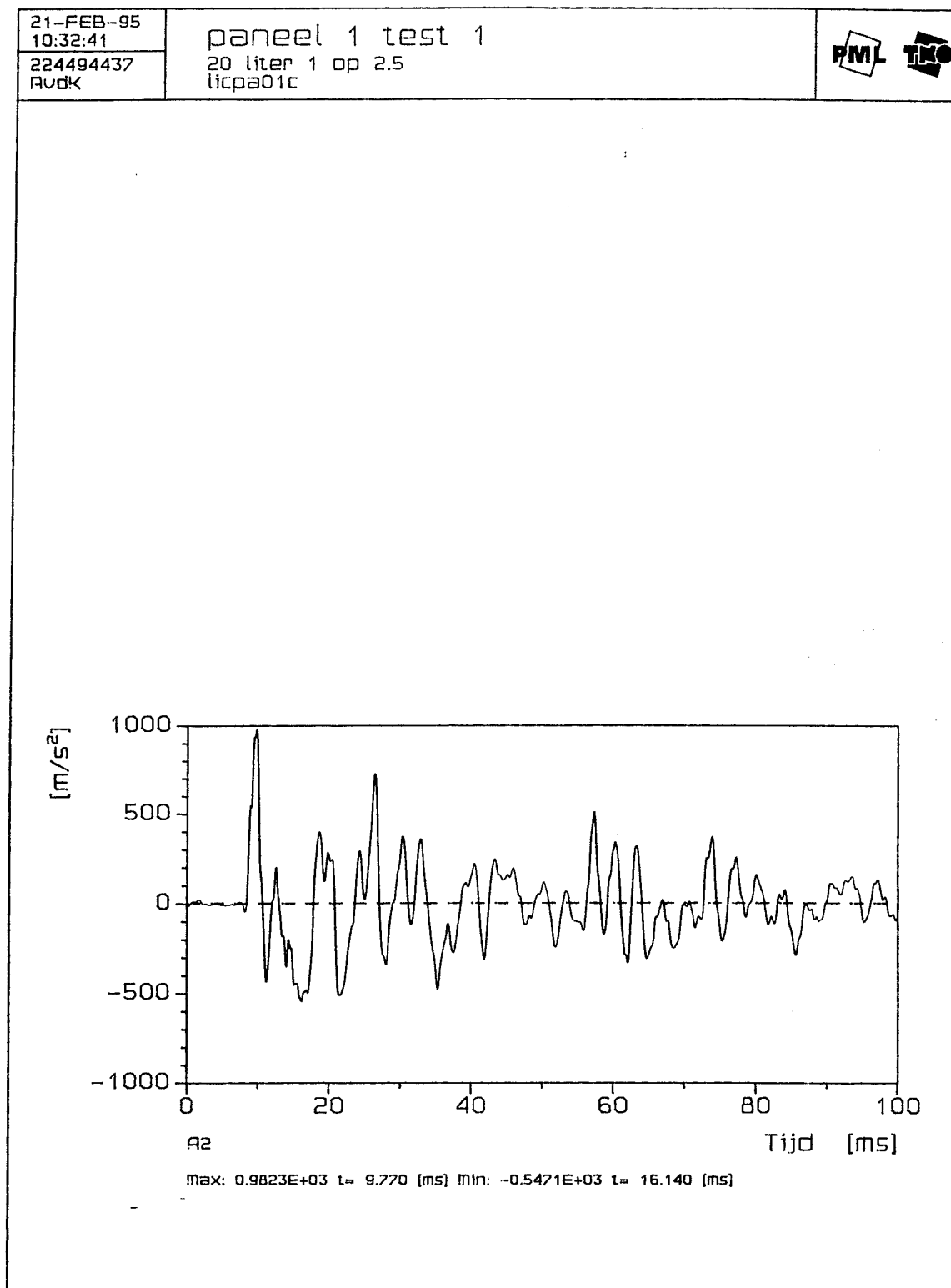
20-FEB-95
16:38:40224494437
RvdK

Paneel 4 test 3

70 liter 1 op 2.5
licpa09bU1
U2
U3
U4

max: 0.3237E+01 t= 32.170 [ms] Min: -0.1386E+01 t= 69.460 [ms]

Bijlage D Grafische weergave van de versnellings signalen

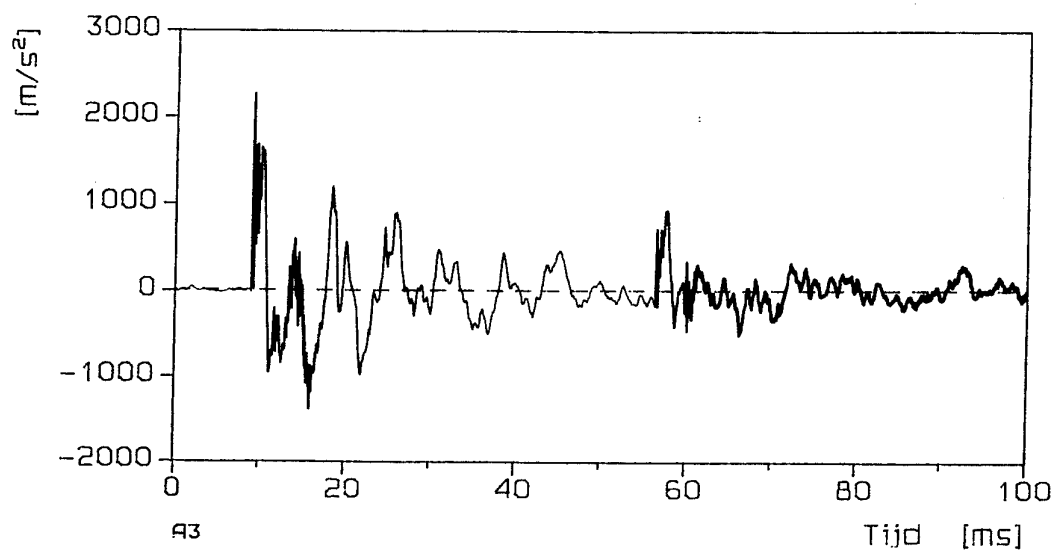


21-FEB-95
10:32:42

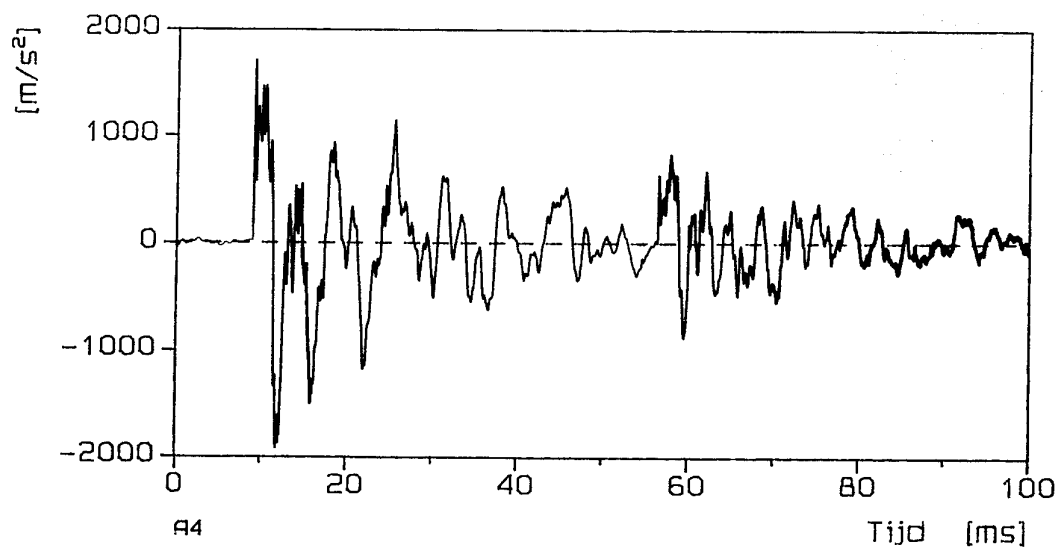
224494437
RvdK

paneel 1 test 1

20 liter 1 op 2.5
licpa01c



Max: 0.2274E+04 t= 9.050 [ms] Min: -0.1388E+04 t= 15.870 [ms]



Max: 0.1710E+04 t= 9.070 [ms] Min: -0.1924E+04 t= 11.840 [ms]

20-FEB-95

14:10:42

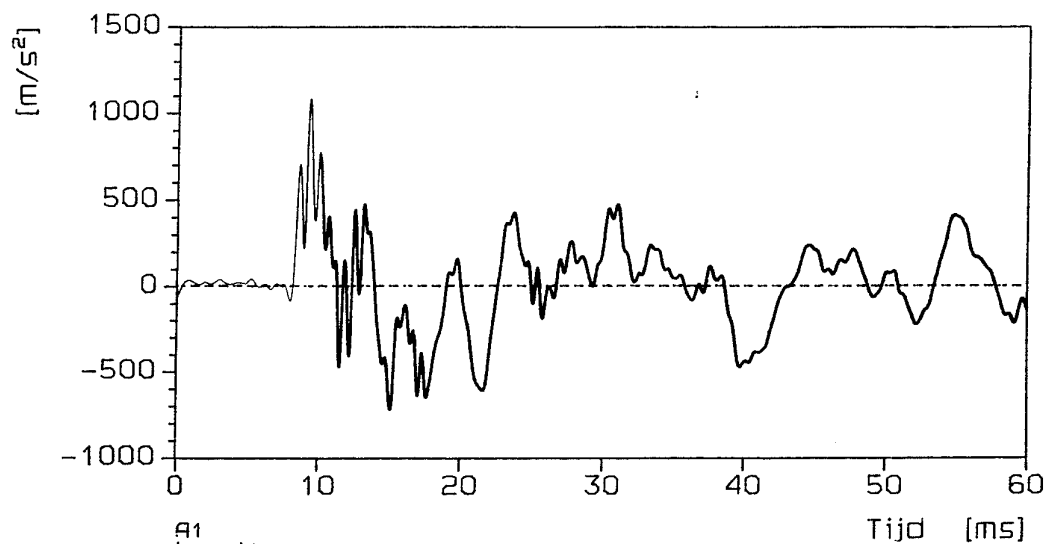
224494437

RvdK

paneel 1 TEST 2

70 liter 1 op 2.5

licpa02b



A1

lp 1 kHz

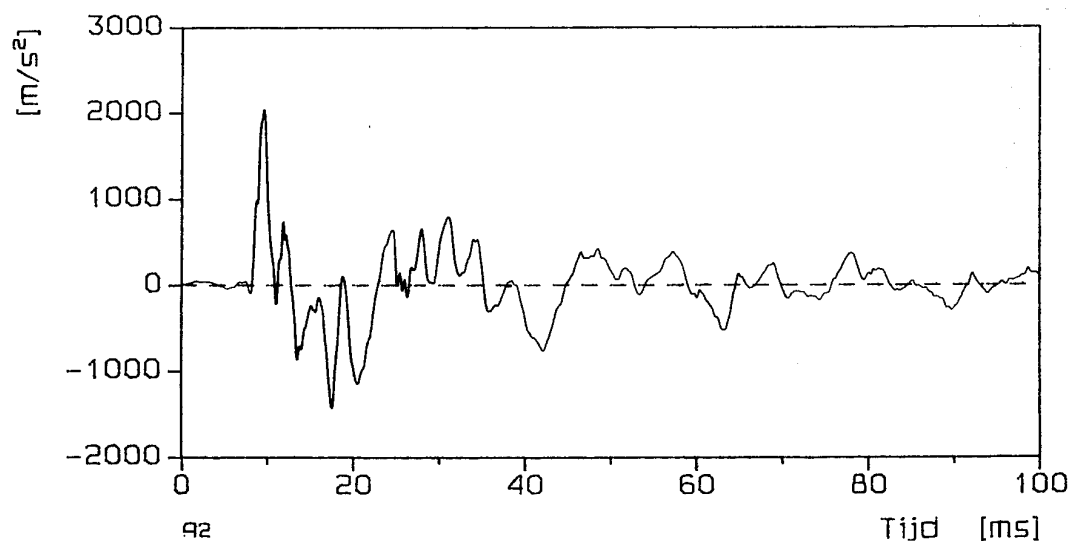
Max: 0.1086E+04 t= 9.324 [ms] Min: -0.7242E+03 t= 15.092 [ms]

21-FEB-95
10:30:29

224494437
RvdK

paneel 1 test 2

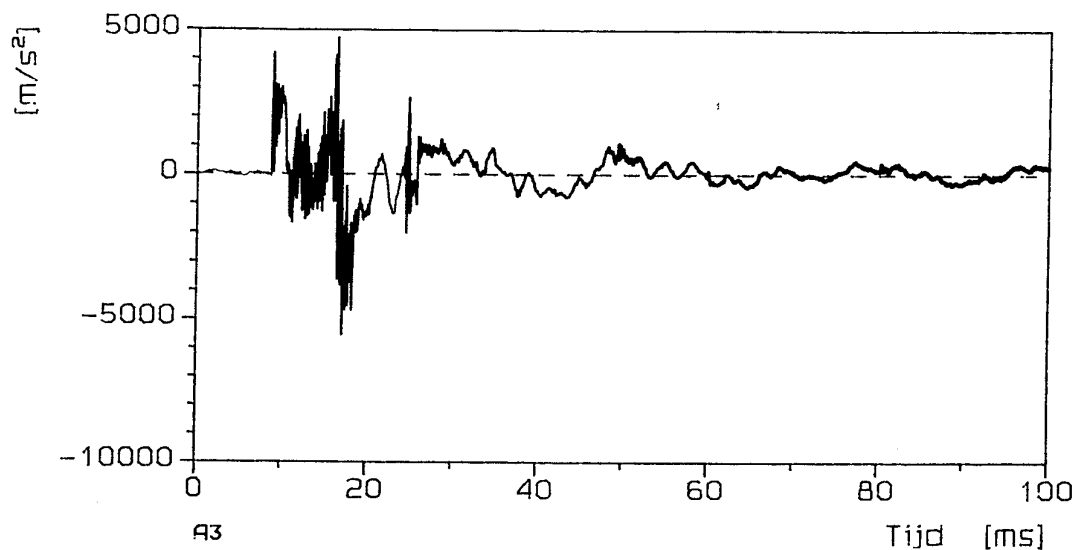
70 liter 1 op 2.5
licpa02c



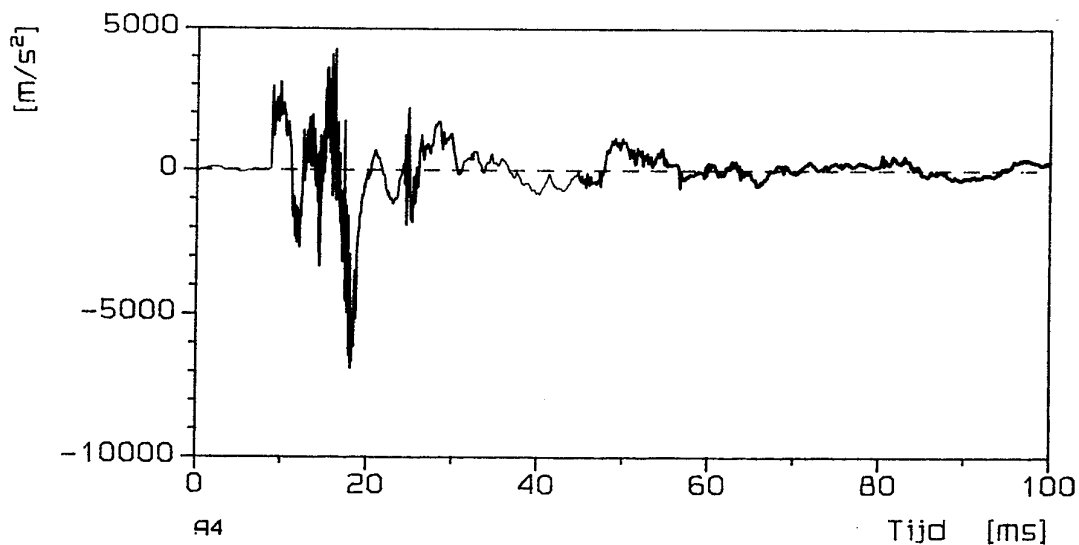
max: 0.2041E+04 t= 9.580 [ms] Min: -0.1436E+04 t= 17.510 [ms]

21-FEB-95
10:30:31224494437
RvdK

paneel 1 test 2

70 liter 1 op 2.5
licpa02c

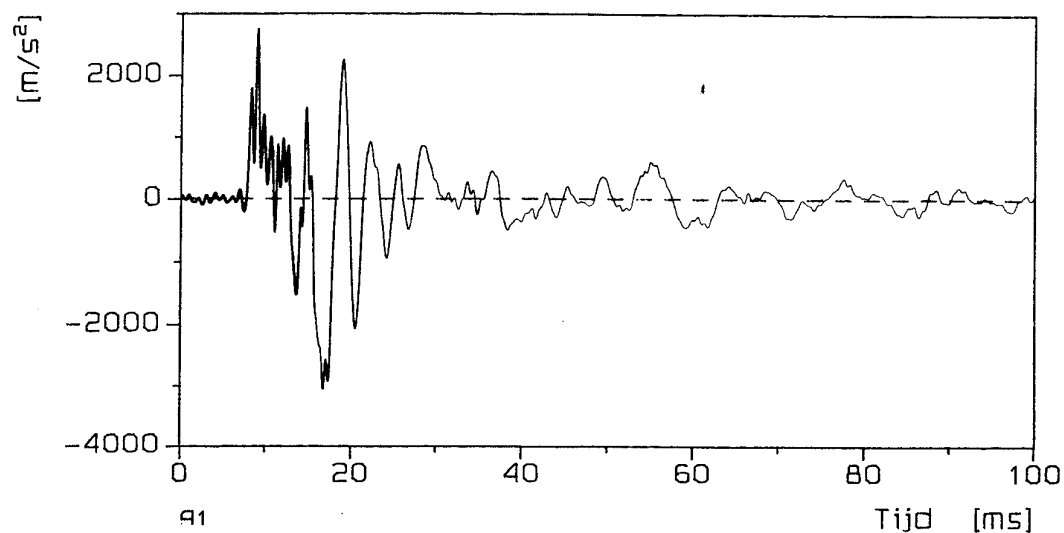
Max: 0.4743E+04 t= 16.340 [ms] Min: -0.5579E+04 t= 17.140 [ms]



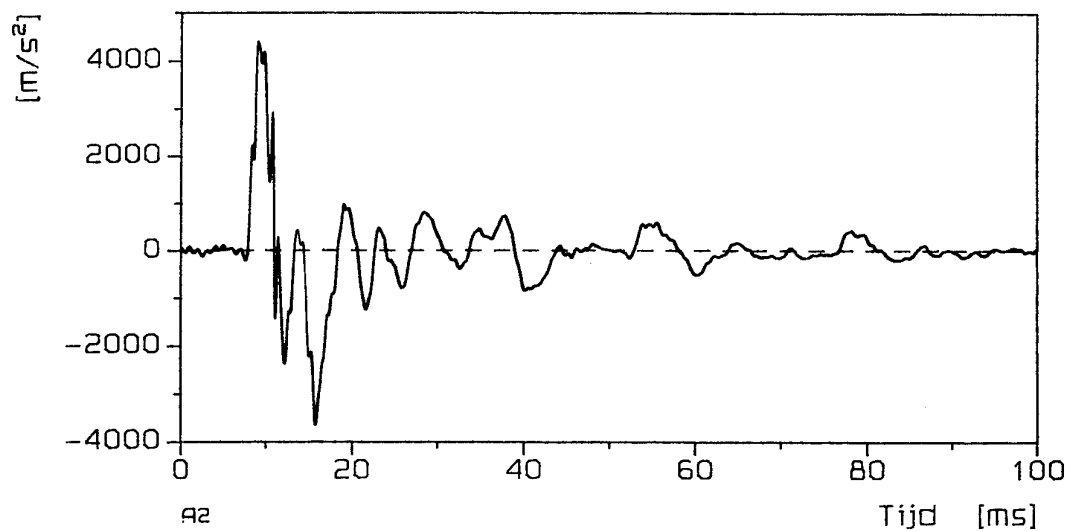
Max: 0.4263E+04 t= 16.150 [ms] Min: -0.6872E+04 t= 18.120 [ms]

28-APR-95
13:55:57RvdK
224494437

Paneel 1, test 3

120 liter 1 op 1
licpa03c

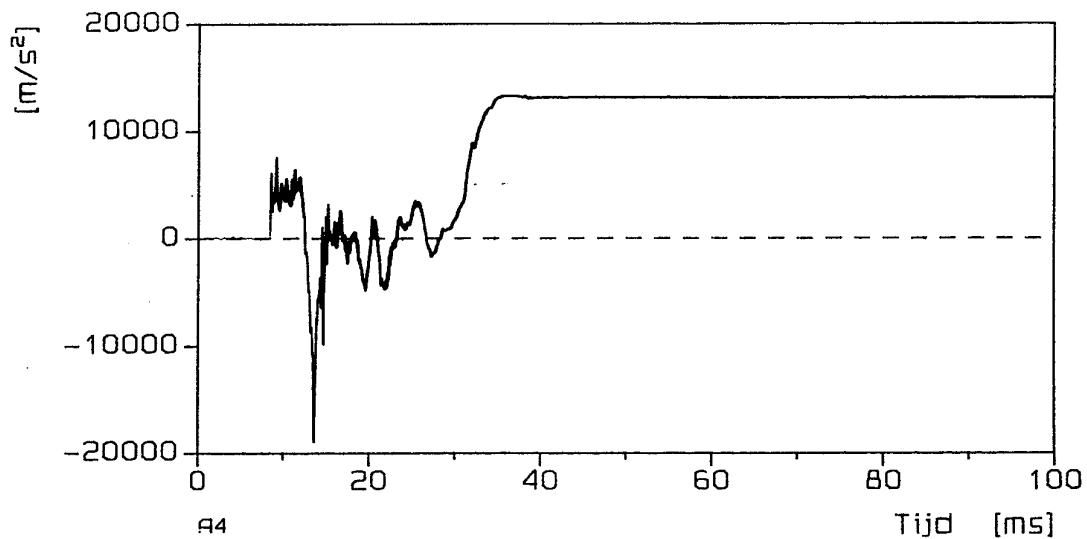
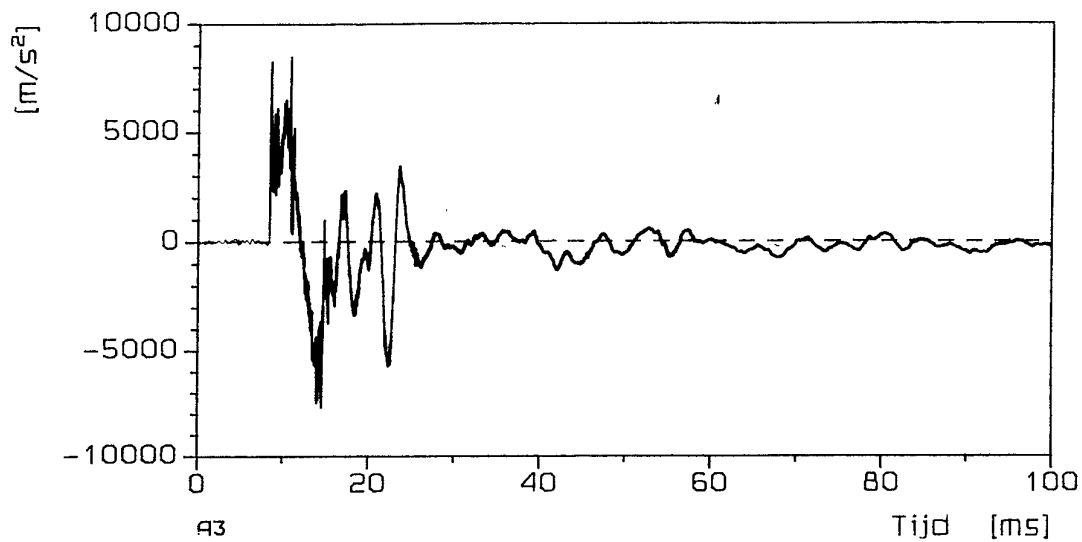
Max: 0.2765E+04 t= 8.890 [ms] Min: -0.3064E+04 t= 16.800 [ms]



Max: 0.4419E+04 t= 9.000 [ms] Min: -0.3653E+04 t= 15.790 [ms]

28-APR-95
13:55:59RvdK
224494437

Paneel 1, test 3

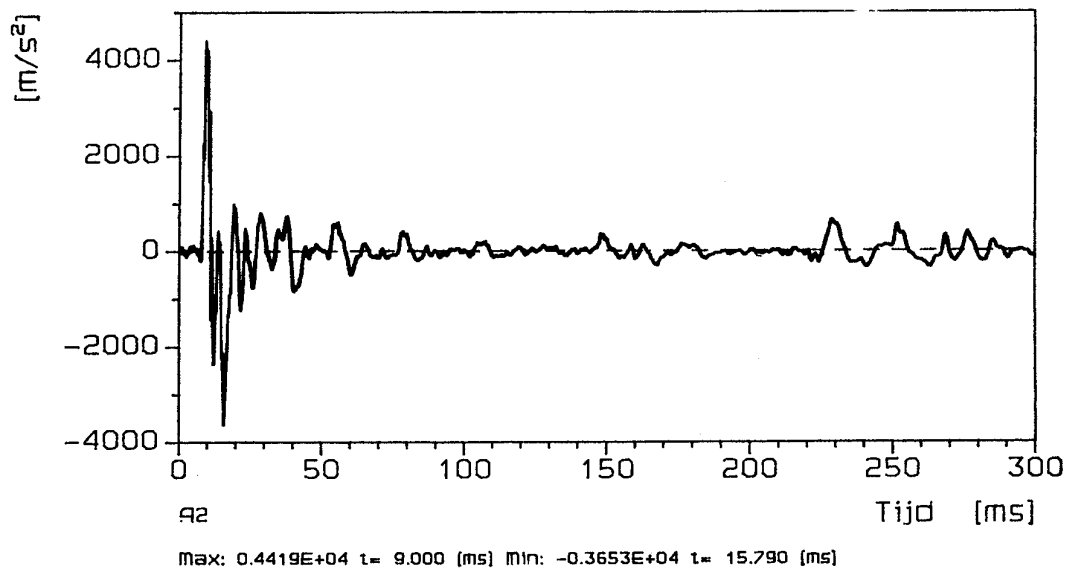
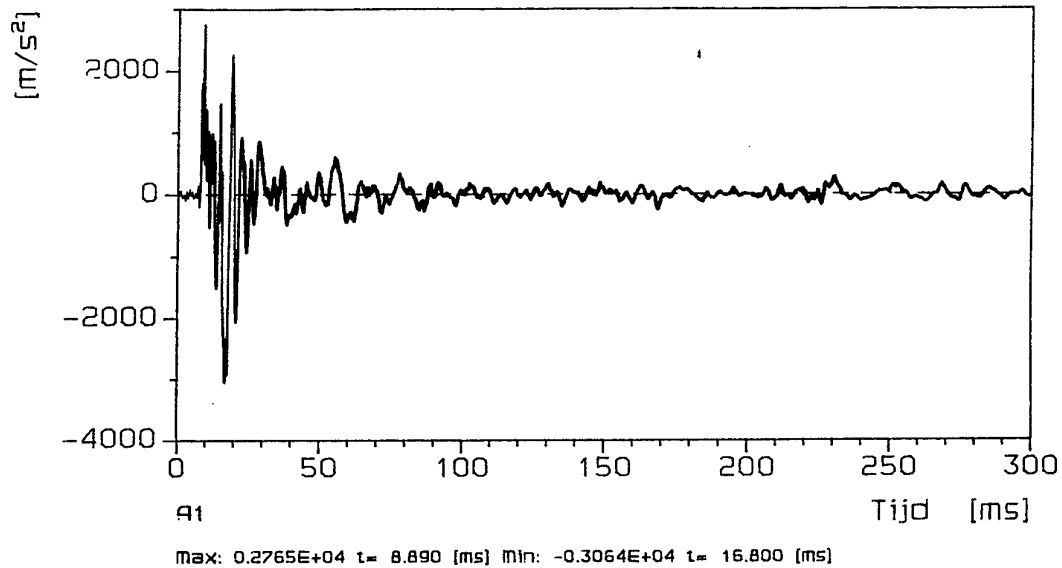
120 liter 1 op 1
licpa03c

28-APR-95
12:01:13

RvdK
224494437

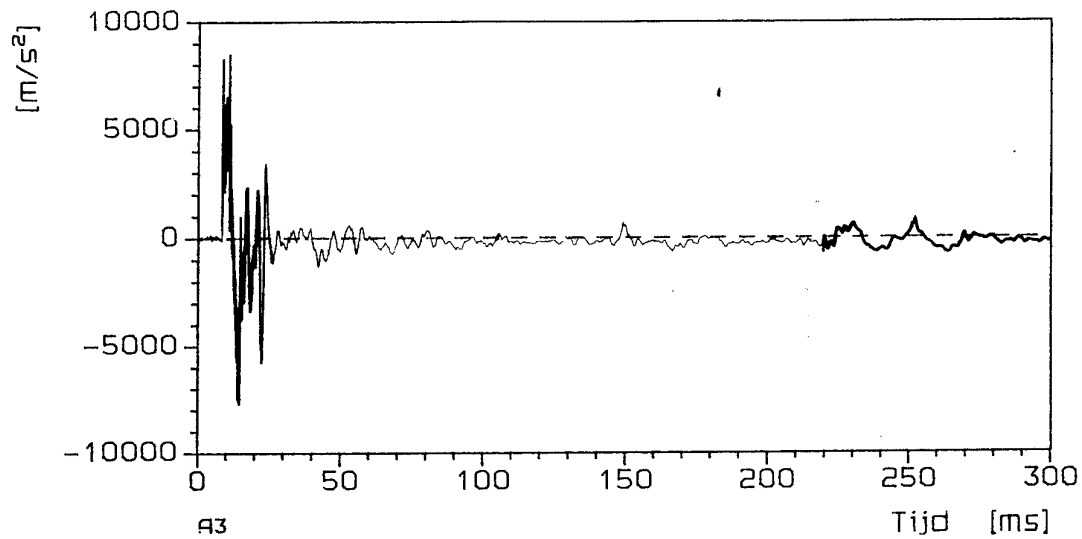
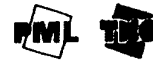
Paneel 1, test 3

120 liter 1 op 1
licpa03c

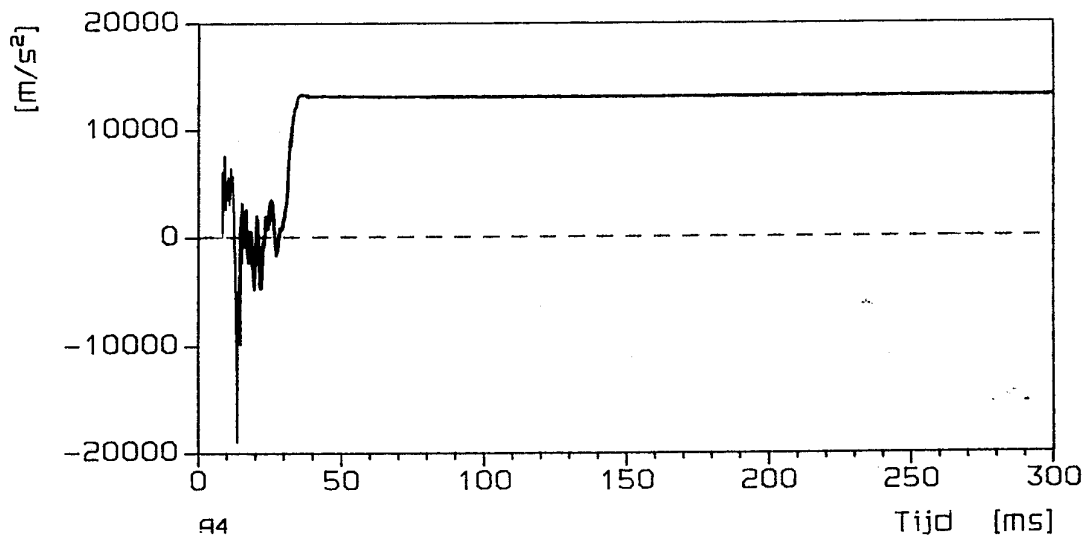


28-APR-95
12:01:16

Paneel 1, test 3

RvdK
224494437120 liter 1 op 1
licpa03c

Max: 0.8501E+04 t= 10.810 [ms] Min: -0.7711E+04 t= 14.560 [ms]



Max: 0.1332E+05 t= 38.060 [ms] Min: -0.1902E+05 t= 13.640 [ms]

20-FEB-95

16:28:45

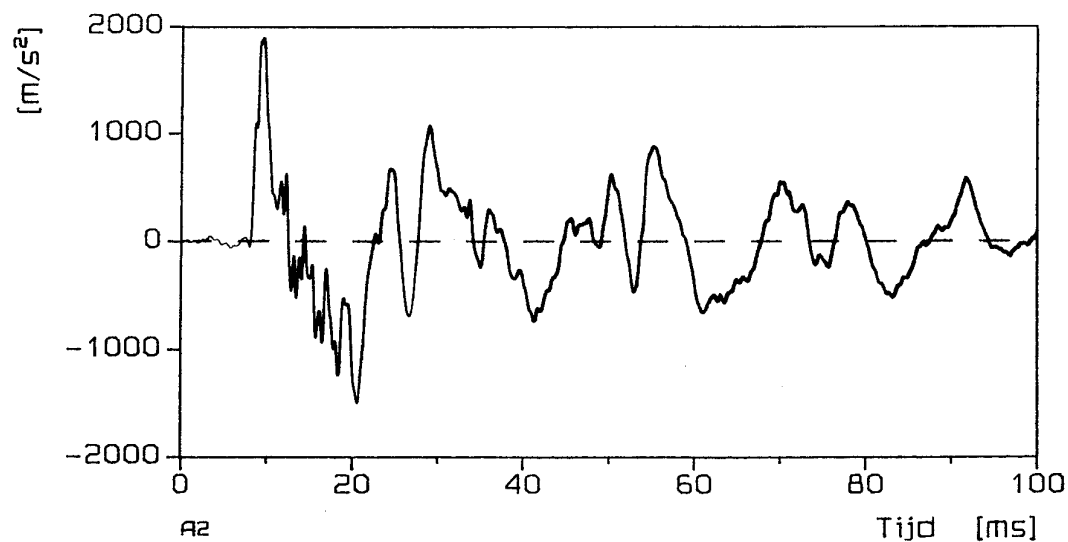
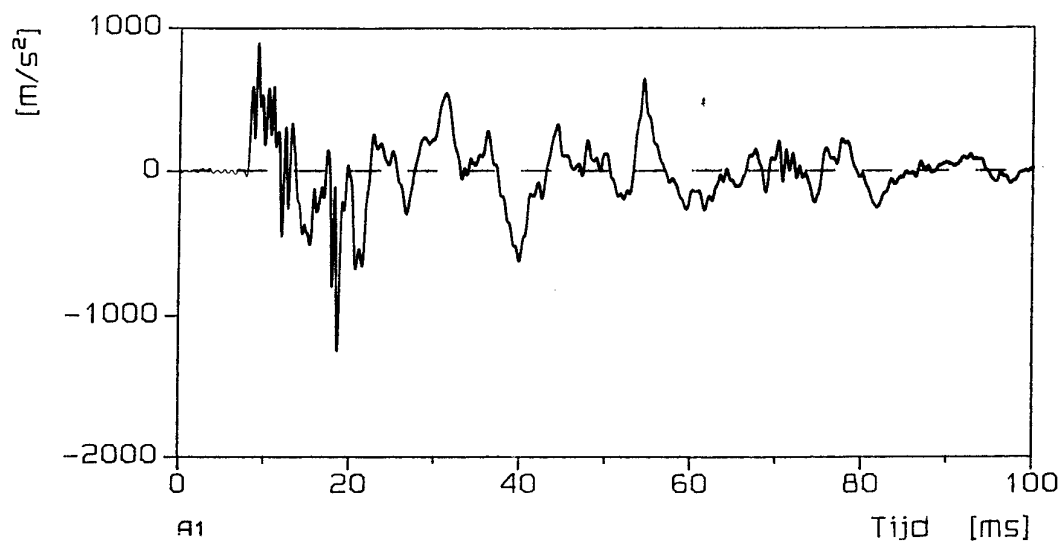
224494437

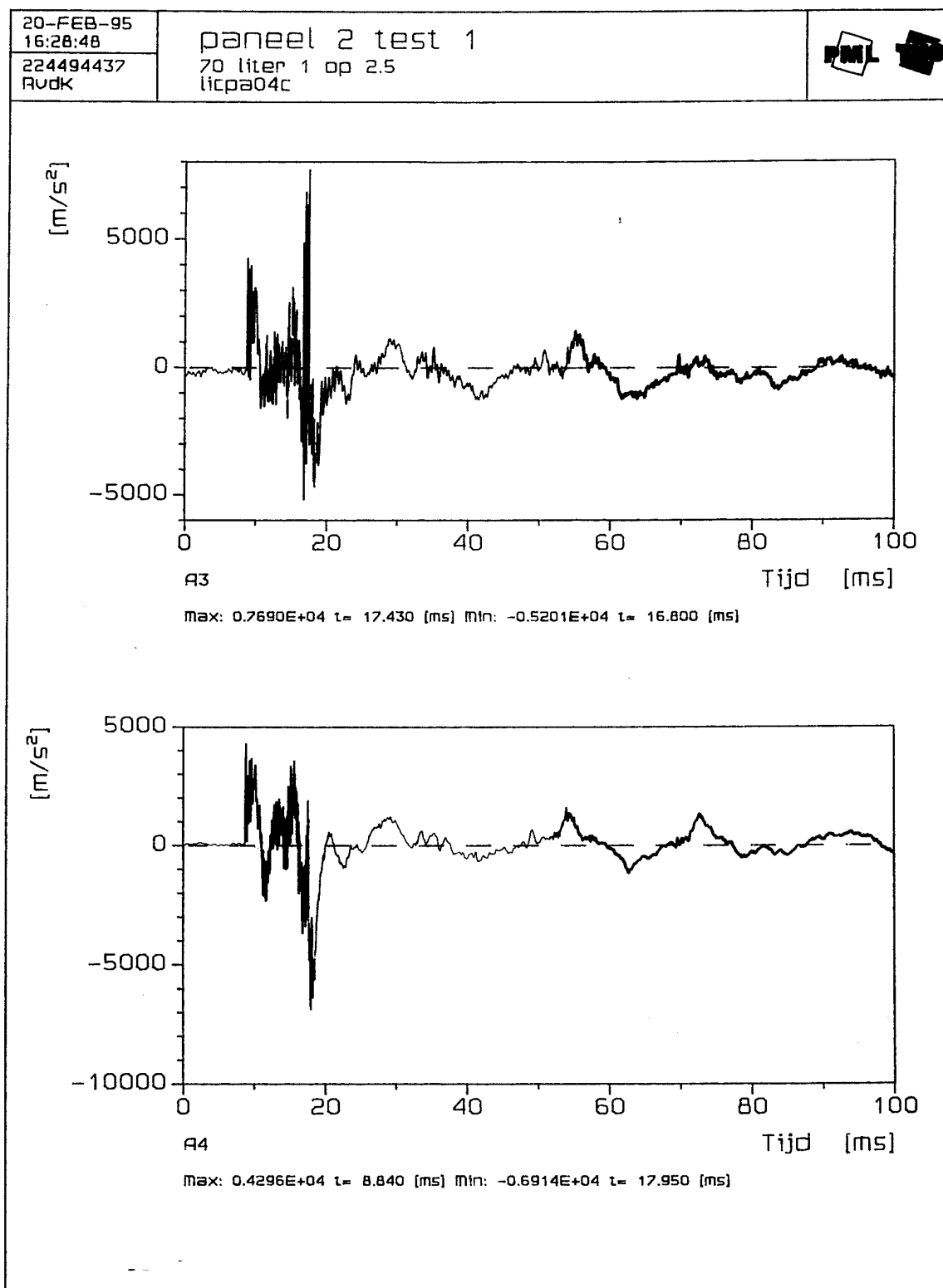
RvdK

paneel 2 test 1

70 liter 1 op 2.5

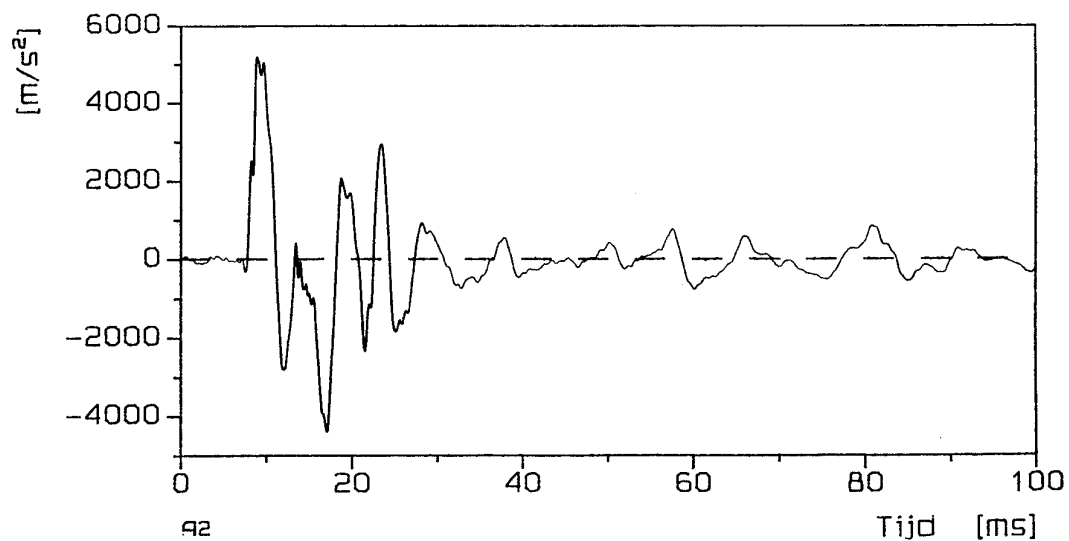
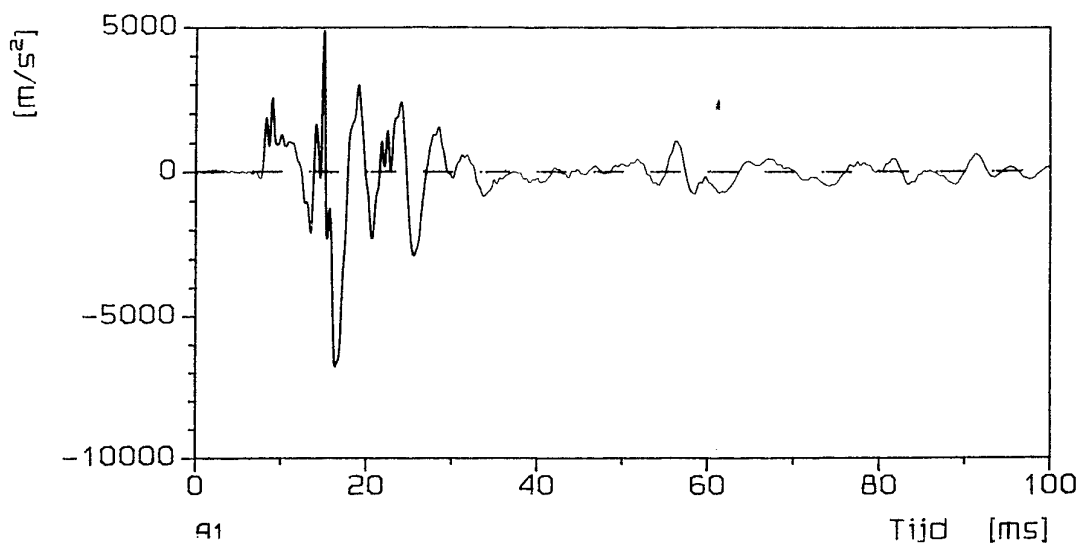
licpa04c





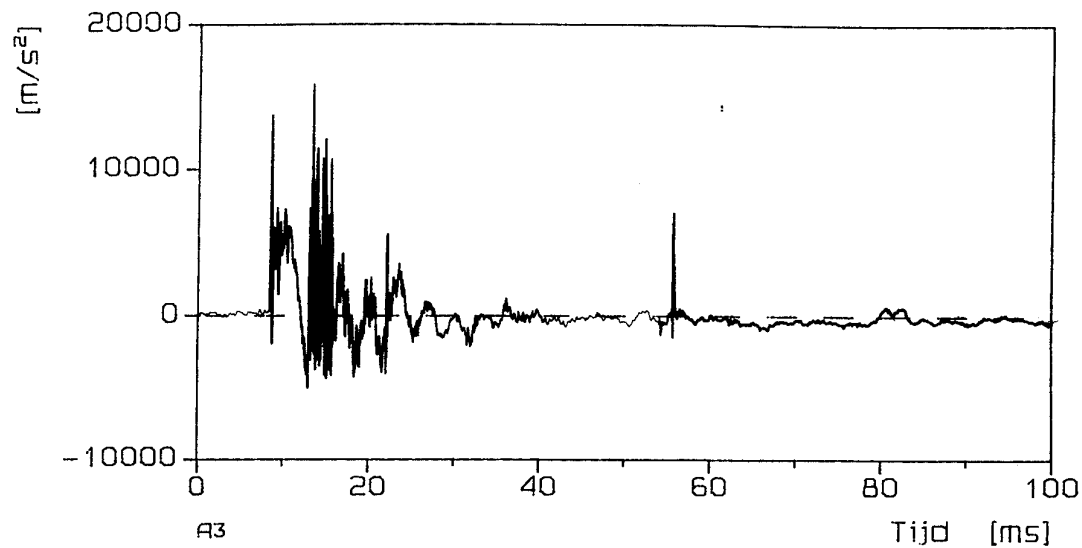
28-APR-95
16:13:41
224494437
RvdK

paneel 2 proef 2
120 liter 1 op 1
licpa05c

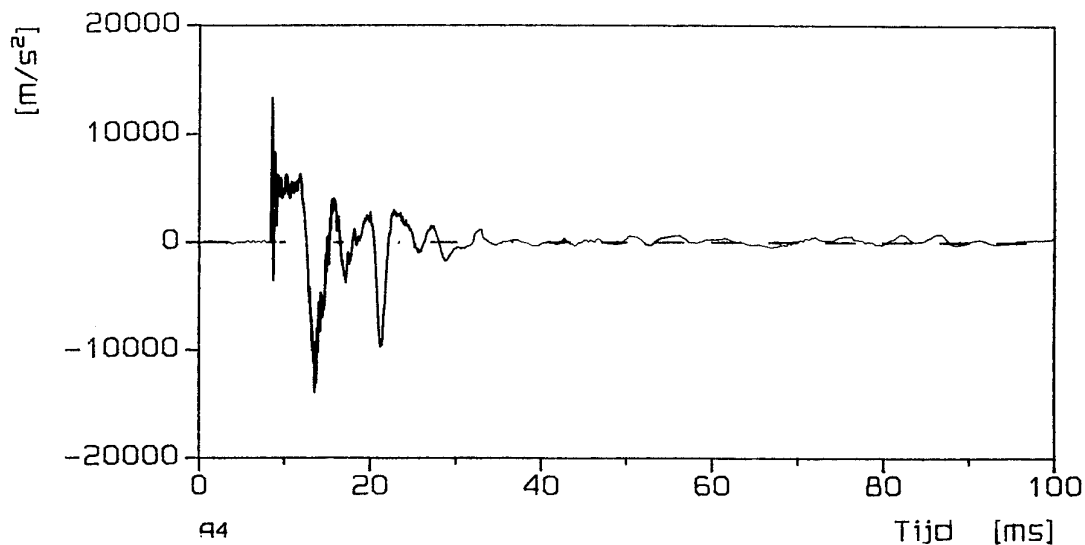


28-APR-95
16:13:44224494437
RvdK

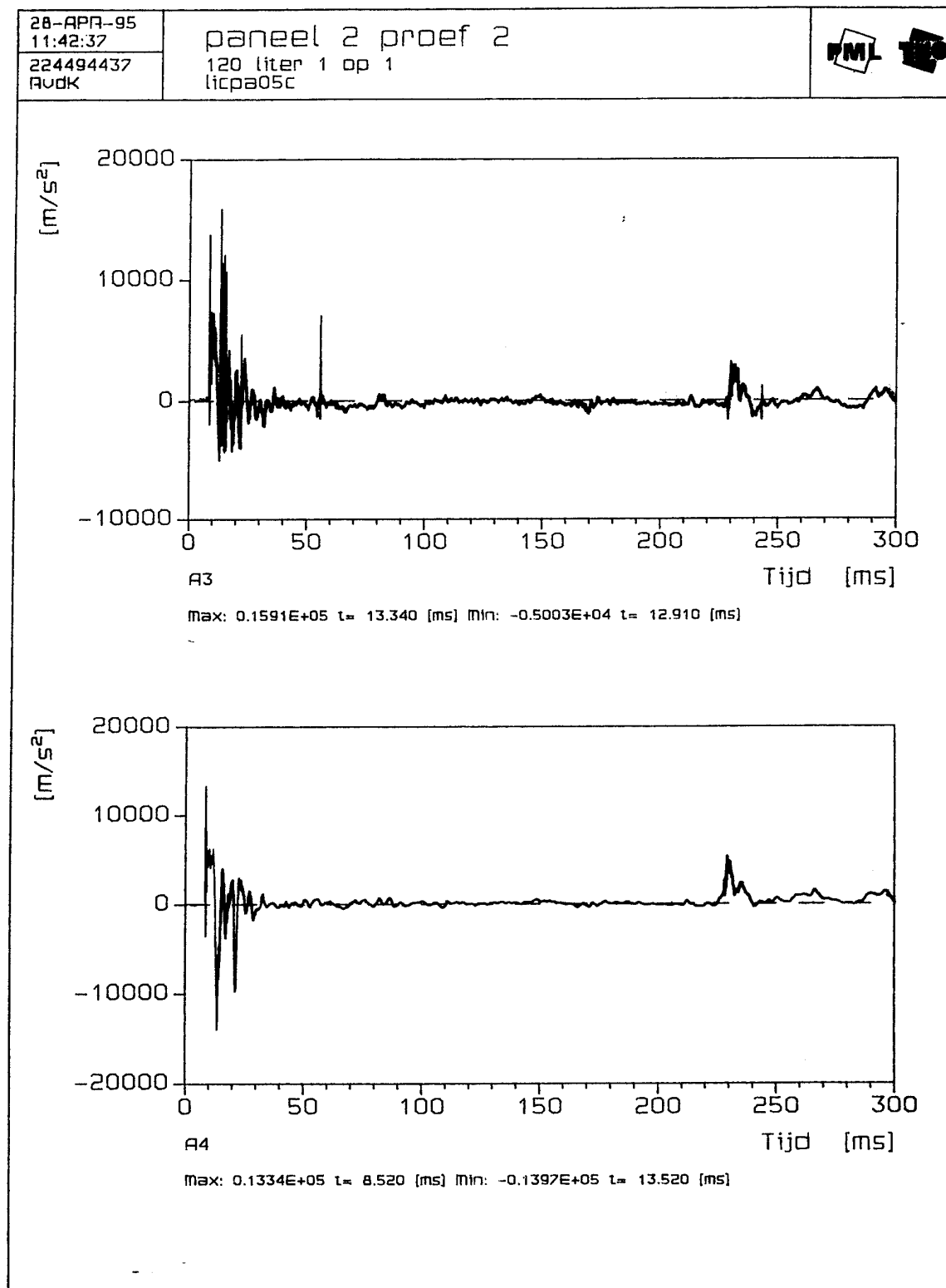
paneel 2 proef 2

120 liter 1 op 1
licpa05c

max: 0.1591E+05 t= 13.340 [ms] Min: -0.5003E+04 t= 12.910 [ms]

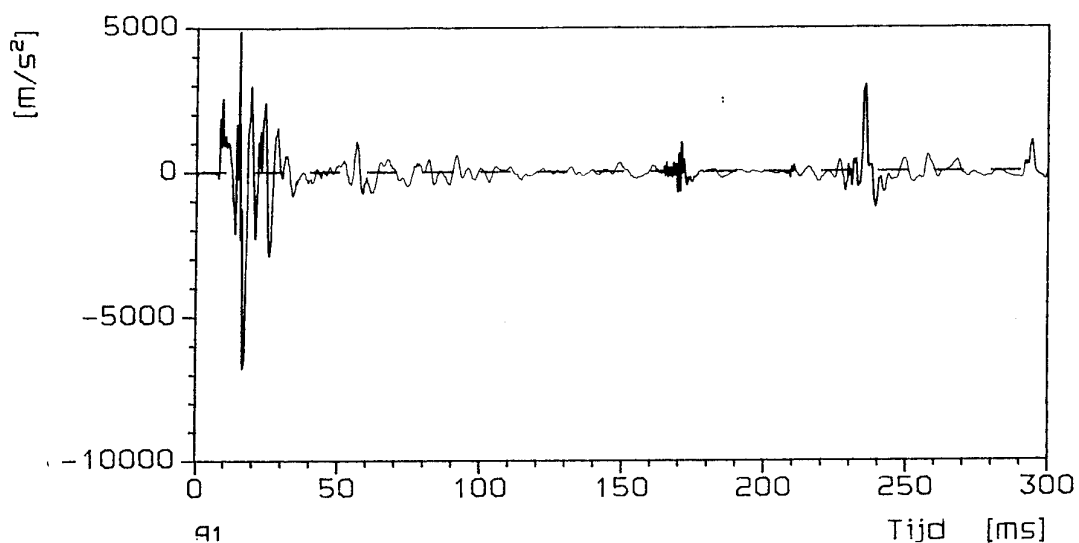


max: 0.1334E+05 t= 8.520 [ms] Min: -0.1397E+05 t= 13.520 [ms]

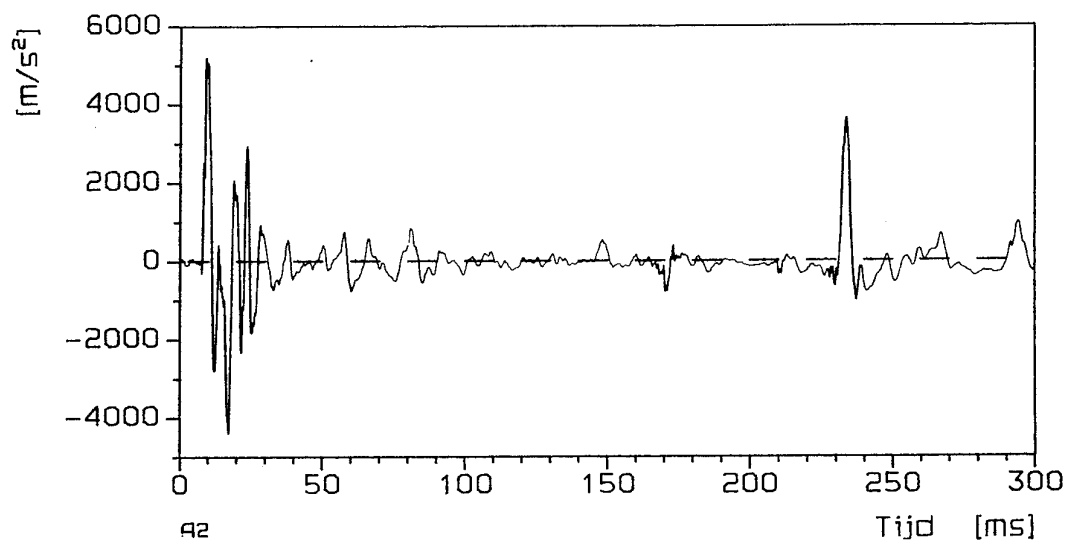


28-APR-95
11:42:34224494437
RvdK

paneel 2 proef 2

120 liter 1 op 1
licpa05c

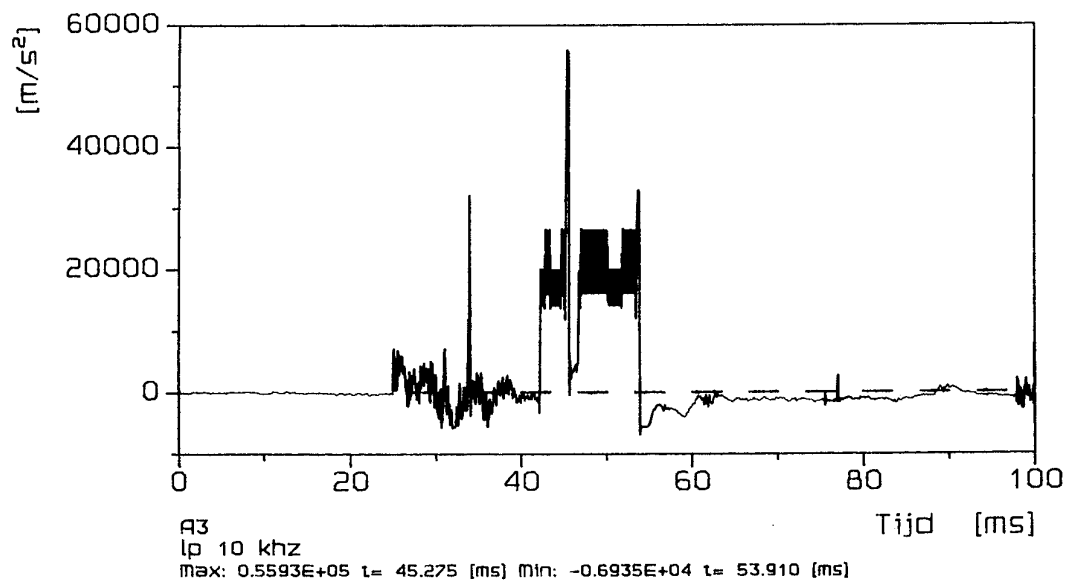
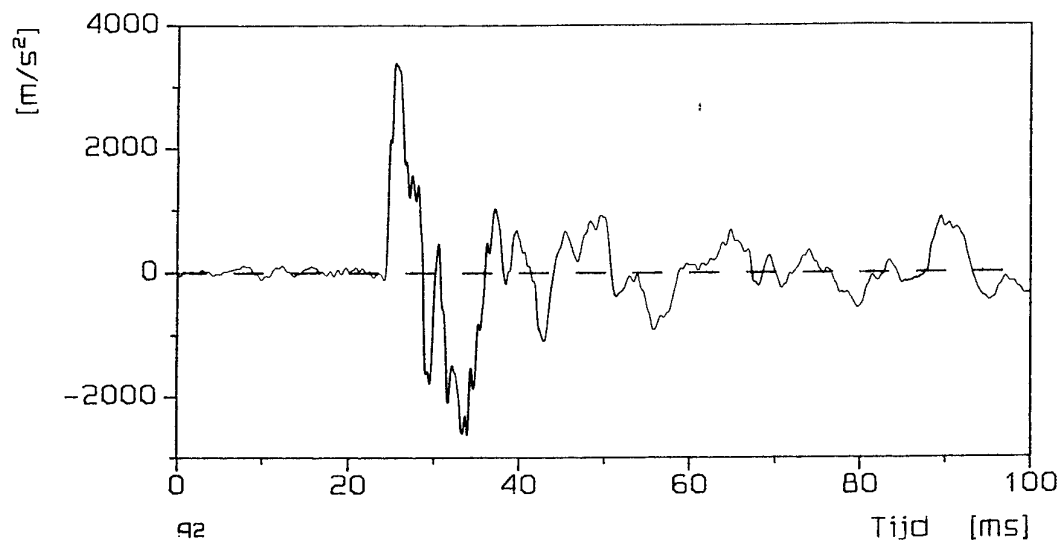
Max: 0.4893E+04 t= 14.950 [ms] Min: -0.6787E+04 t= 16.380 [ms]

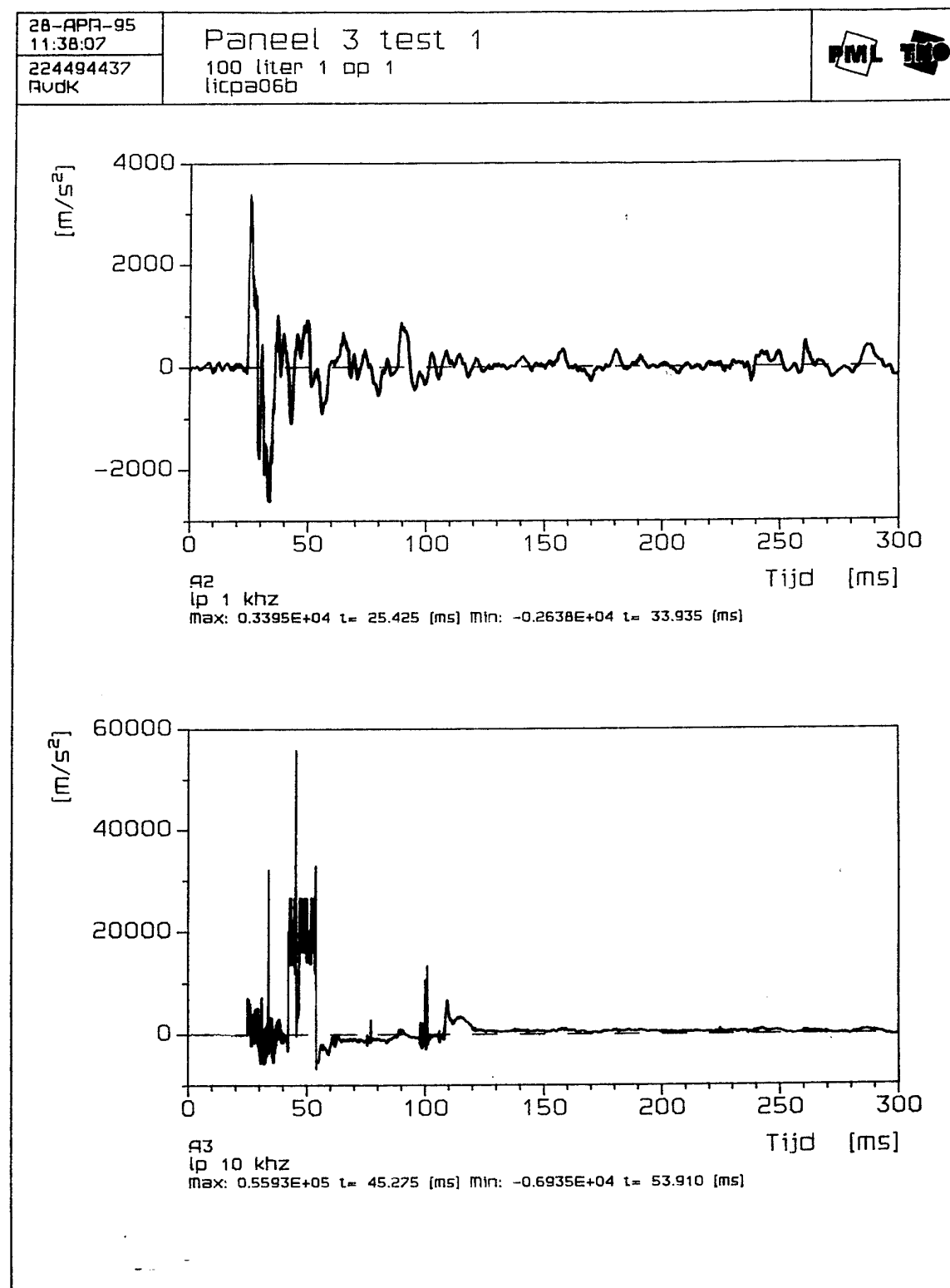


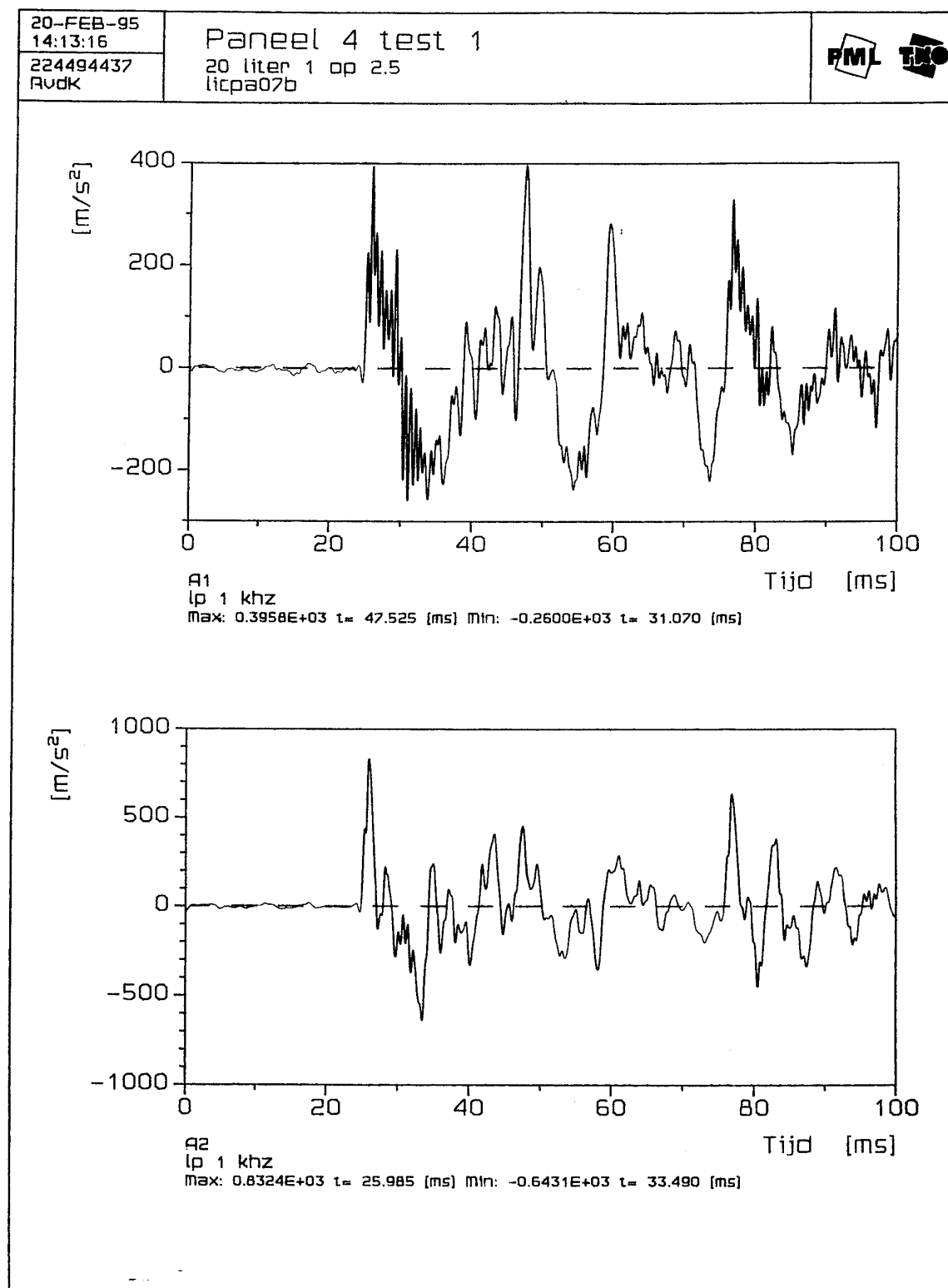
Max: 0.5198E+04 t= 8.930 [ms] Min: -0.4413E+04 t= 17.090 [ms]

20-FEB-95
14:16:19

Paneel 3 test 1

224494437
RvdK100 liter 1 op 1
licpa06b



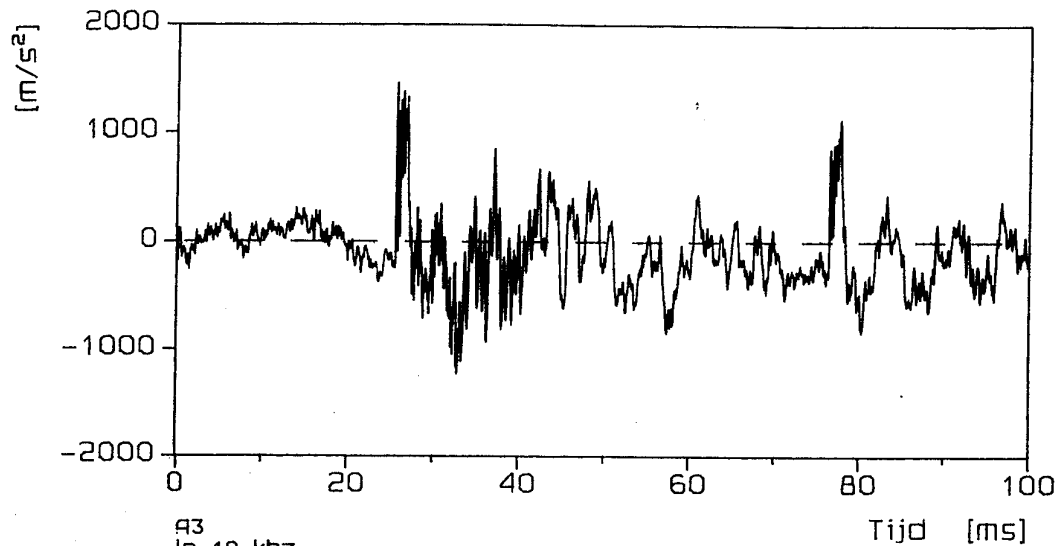


20-FEB-95
14:13:19

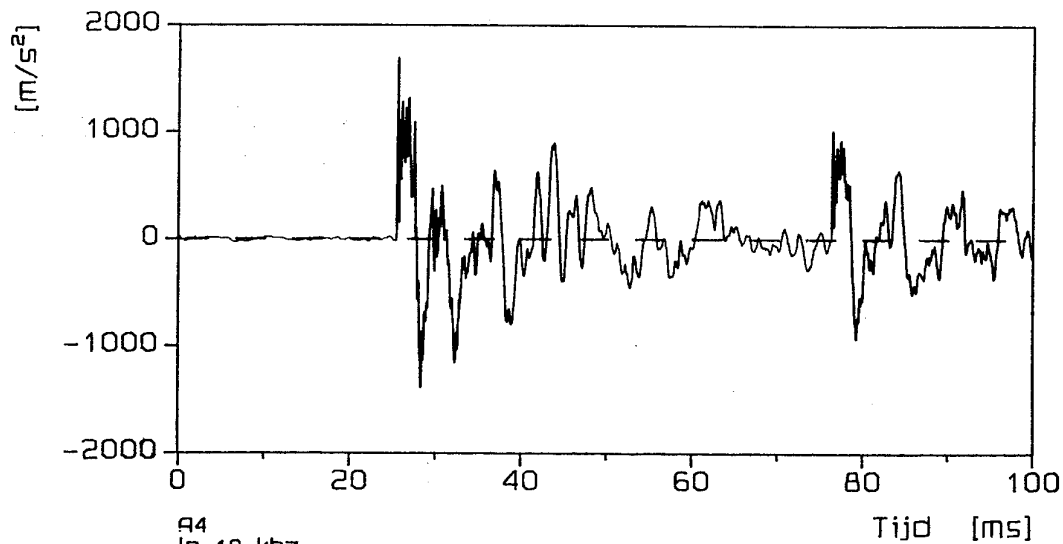
224494437
RvdK

Paneel 4 test 1

20 liter 1 op 2.5
licpa07b



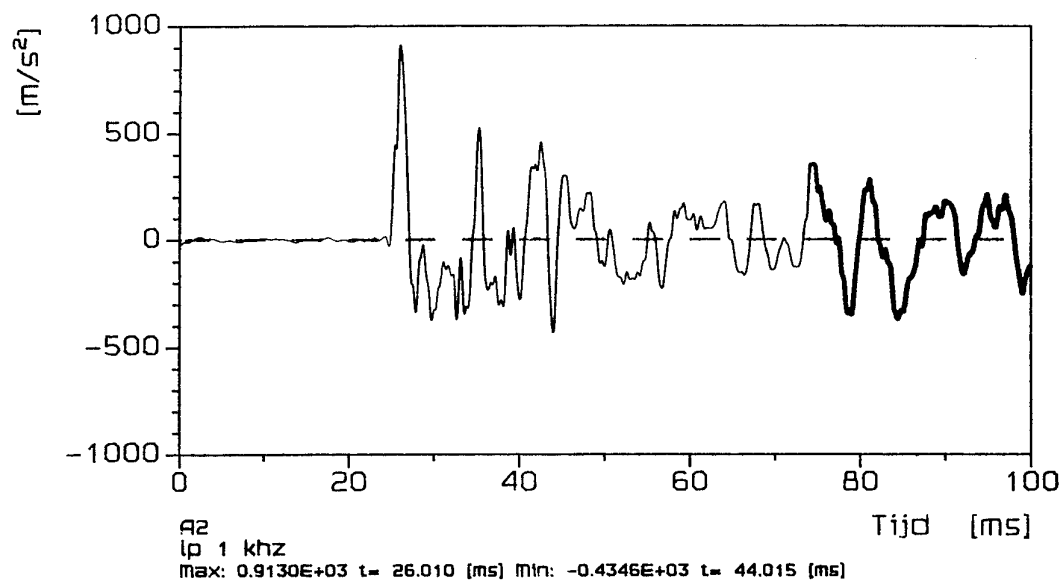
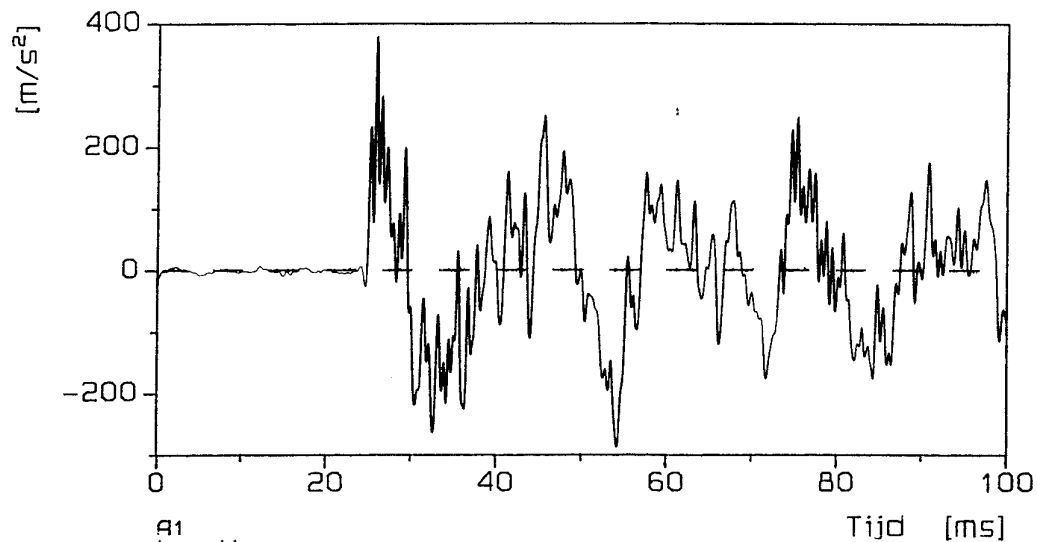
A3
lp 10 khz
Max: 0.1461E+04 t= 25.580 [ms] Min: -0.1233E+04 t= 32.705 [ms]



A4
lp 10 khz
Max: 0.1689E+04 t= 25.580 [ms] Min: -0.1394E+04 t= 28.310 [ms]

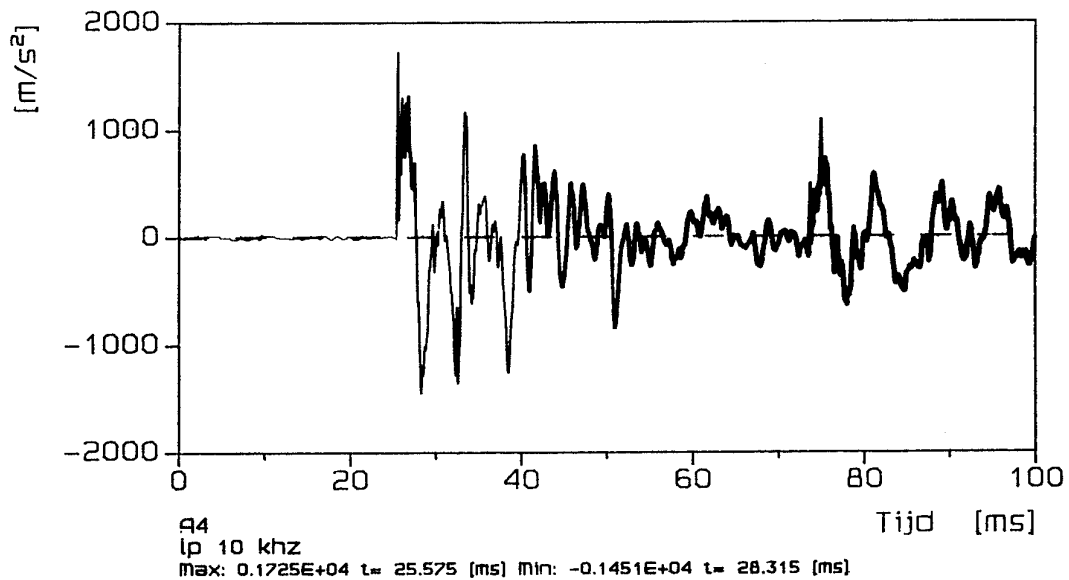
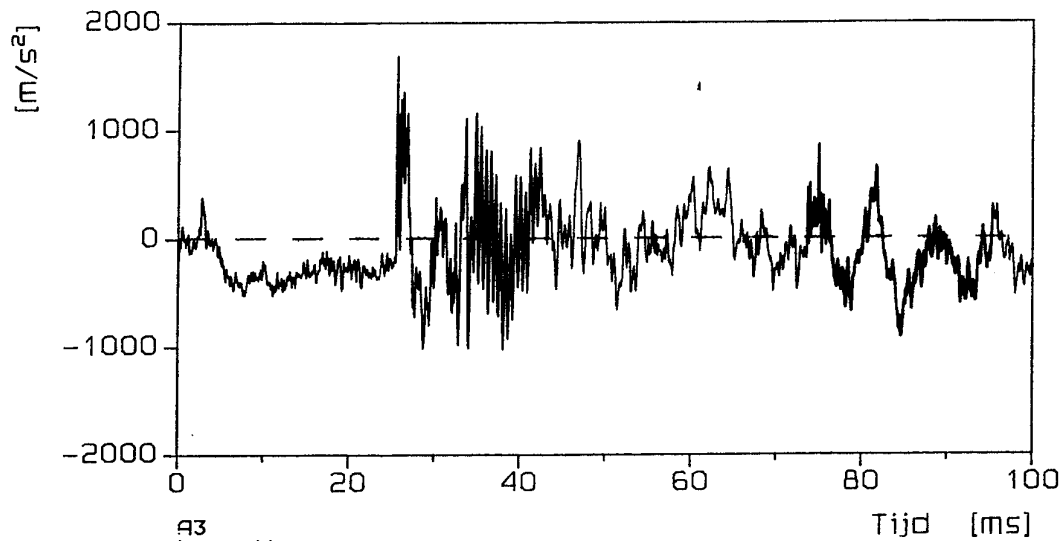
17-FEB-95
14:25:26
224494437
RvdK

Paneel 4 test 2
20 liter 1 op 2.5
licpa08b



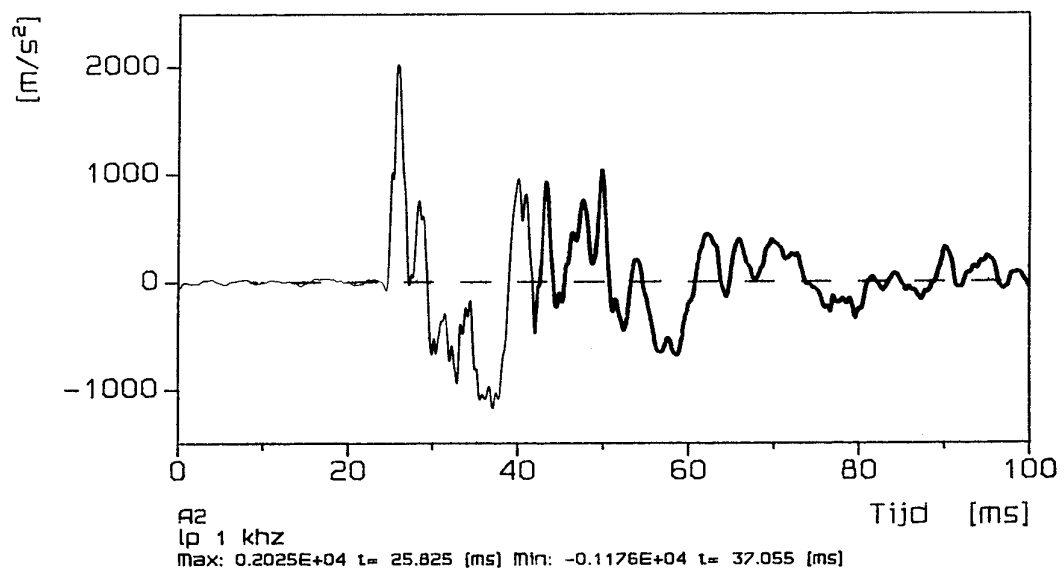
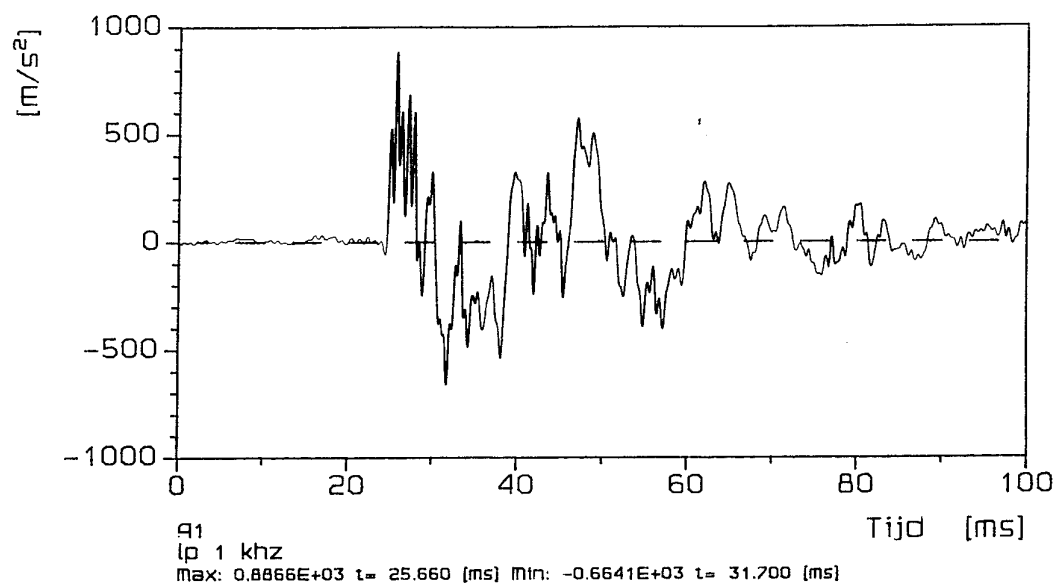
17-FEB-95
14:25:29224494437
RvdK

Paneel 4 test 2

20 liter 1 op 2.5
licpa08b

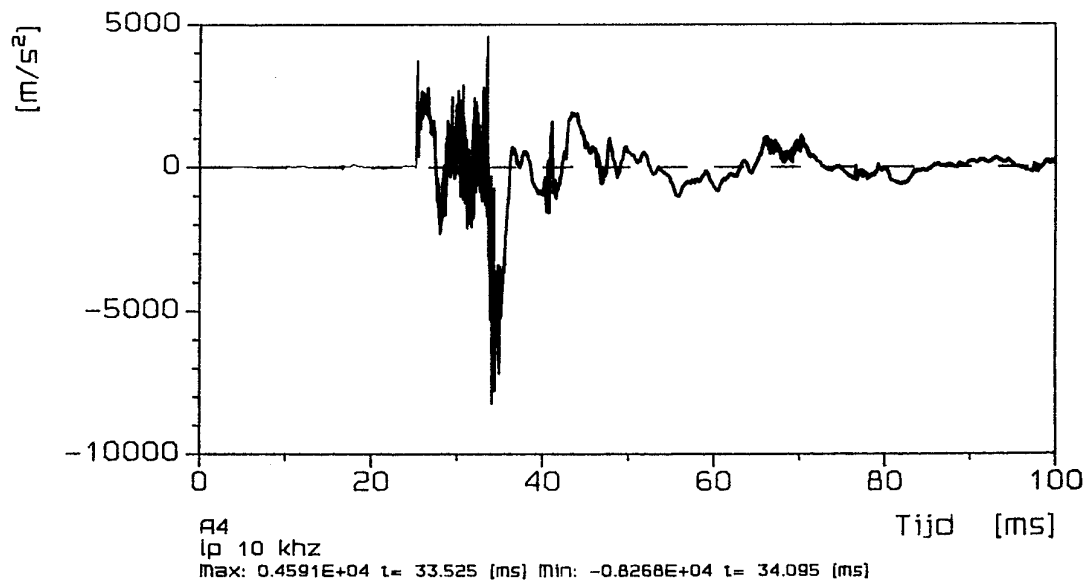
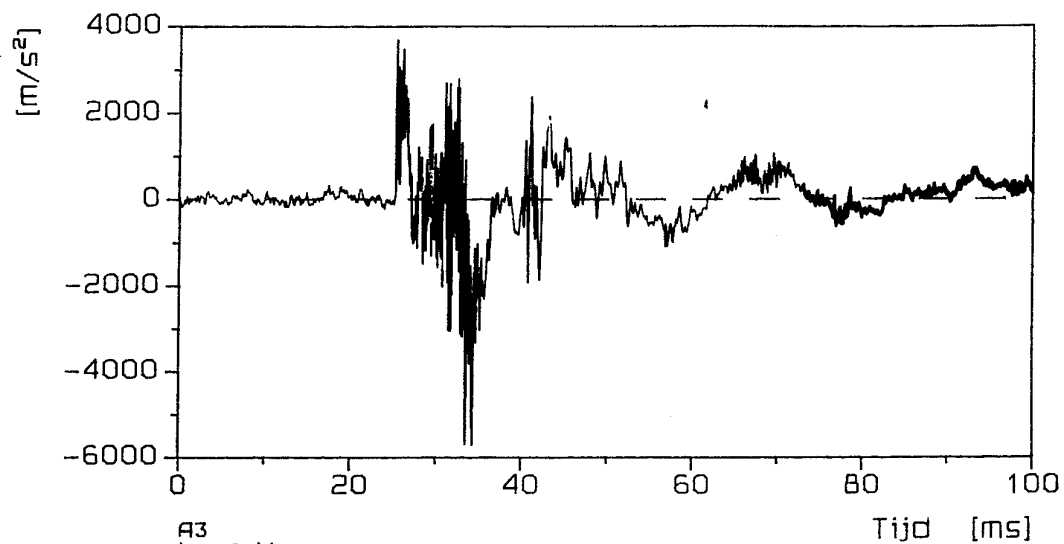
20-FEB-95
16:38:44
224494437
RvdK

Paneel 4 test 3
70 liter 1 op 2.5
licpa09b



20-FEB-95
16:38:46224494437
RvdK

Paneel 4 test 3

70 liter 1 op 2.5
licpa09b

ONGERUBRICEERD
REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL) TD95-1008	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. PML 1995-A61
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 224494437	5. CONTRACT NO. A93/D/434	6. REPORT DATE June 1996
7. NUMBER OF PAGES 105 (incl. 4 annexes, excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 2	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Onderzoek naar de dynamische en ballistische sterkte van een type kunststof lichtgewicht paneel (Study to the dynamic and ballistic strength of one type of lightweight composite panel)		
11. AUTHOR(S) R.M. van de Kastele Ir. J.C.A.M. van Doormaal		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) AWOO/DWGT, P.O. Box 20701, 2500 ES Den Haag, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) A feasibility study has been carried out on the possibility to apply existing lightweight heat and pressure resistant panels for protection against ballistic and shock wave effects. The purpose of the investigation was to test experimentally one type of lightweight panel and determine its resistance against shock wave and ballistic effects. The panel was not designed for that purpose. Four panels were used for the dynamic resistance tests and one for the ballistic resistance tests. The dynamic resistance was studied by placing the panels at the end of a shock wave simulator and by loading them with a shock wave. The response of the panels under shock load was measured. The ballistic resistance was found by determining the limit speed of a fragmentation simulation projectile which was fired on the panel. The overall conclusion is that the panel in its present form is not suitable for the application as lightweight panel that should provide protection against shock wave of ballistic threat. Recommendations for improvements are given.		
16. DESCRIPTORS Pressure resistance Heat resistance Protection Shock waves		IDENTIFIERS Panels Plastics Ballistic protection Ballistic tolerance Dynamic tests
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

ONGERUBRICEERD

Distributielijst*

- 1*/2* DWOO
- 3 DWOO
- 4* HWO-KL
- 5* HWO-KLu
- 6* HWO-KM
- 7/8 DGW&T/CD/TB
Ir. D. Boon
- 9 KMA, Militair Logistieke Wetenschappen
Voorzitter
- 10/12 Bibliotheek KMA
- 13 Bureau TNO-DO
- 14* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. B. Scarlett, M.Sc.
- 15* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. ir. K.F. Wakker
- 16 TNO-PML, Directeur; daarna reserve
- 17 TNO-PML, Directeur Programma; daarna reserve
- 18 TNO-PML, Hoofd Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid
Dr. D.W. Hoffmans
- 19/23 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid, Groep Explosiepreventie
en Bescherming
Ir. J. Weerheijm, Ir. R.M.M. van Wees, R.M. van de Kastele,
Ir. J.C.A.M. van Doormaal, reserve
- 24 TNO-PML, Documentatie
- 25 TNO-PML, Archief

* De met een asterisk (*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het managementuittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.